مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

المنظمة العربية للترجمة

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

وكالة الطاقة الدولية

ادخار الموارد

تقانات النفط والغاز من أجل أسواق الطاقة المستقبلية

Resources to Reserves

Oil and Gas Technologies for the Energy Markets of the Future

ترجمة

مظهر بايرلي

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة

علي مولا

وكالـة الطاقـة الدوليـة

تأسست وكالة الطاقة الدولية (IEA) في تشرين الثاني/نوفمبر عام 1974 كهيئة مستقلة ضمن الإطار التنظيمي للتطوير والتعاون الاقتصادي OECD لتطبيق برنامج طاقة دولي. وهي تعمل على تنفيذ برنامج شامل للتعاون الطاقي ضمن 26 دولة من أصل 30 دولة عضو في الـ OECD.

الأهداف الأساسية لـ IEA هي:

- إبقاء وتطوير الأنظمة لكي تتماشى مع استنزاف النفط.
- تعزيز سياسات الطاقة الحكيمة عالمياً عن طريق علاقات التعاون مع الدول غير الأعضاء، والصناعات والمنظمات الدولية.
- تشغيل نظام معلومات ثابت في سوق النفط الدولي.
- تحسين عملية تزويد الطاقة العالمية والبناء المطلوب عن طريق تطوير موارد طاقة بديلة وزيادة كفاءة الطاقة المستخدمة.
- المساهمة في تكامل السياسات البيئية والطاقية.

الدول الأعضاء في الـ IEA هي: أستراليا، النمسا، بلجيكا، كندا، جمهورية التشيك، الدنمارك، فنلندا، فرنسا، ألمانيا، اليونان، هنغاريا، إيرلندا، إيطاليا، اليابان، كوريا، اللكسمبورغ، هولندا، نيوزيلندا، النرويج، البرتغال، إسبانيا، السويد، سويسرا، تركيا، المملكة المتحدة، الولايات المتحدة. ويؤدي الاتحاد الأوروبي دوراً في عمل الـ IEA.

منظمـة التطويـر والتعـاون الاقتصـادي (OECD)

إن منظمة الـ OECD هي ميدان عام فريد تعمل فيه حكومات 30 دولة ديمقراطية معاً من أجل عنونة التحديات الاقتصادية، والاجتماعية والبيئية للعولمة. وتحتل أيضاً الصدارة في الجهود من أجل تفهم ومساعدة الحكومات لكي تستجيب للتطورات والاهتمامات الجديدة. مثلاً: السيطرة الشاملة واقتصاد المعرفة وتحديات السكان المعمرين. تقوم المنظمة بتوفير بيئة تمكّن الحكومات من مقارنة خبرات (تجارب) السياسة والبحث عن حلول للمشاكل العامة وتعريف الممارسة والعمل الجيدين من أجل تنسيق السياسات المحلية والعالمية.

الدول الأعضاء في الـ OECD هي: أستراليا، النمسا، بلجيكا، كندا، جمهورية التشيك، الدنمارك، فنلندا، فرنسا، ألمانيا، اليونان، هنغاريا، أيسلندا، إيرلندا، إيطاليا، اليابان، كوريا، اللكسمبورغ، المكسيك، هولندا، نيوزيلندا، النرويج، بولندا، البرتغال، سلوفاكيا، إسبانيا، السويد، سويسرا، تركيا، المملكة المتحدة، الولايات المتحدة. ويؤدي الاتحاد الأوروبي دوراً في عمل الـ OECD.

شكـــر وامتنـــان

إن المؤلف الرئيس لهذا الكتاب هو كريستان بيسون (Christian Besson) الذي ساهم في هذا الجهد الجماعي مشكّلاً فريقاً واسعاً من الزملاء في الـ IEA، ومن خبراء من حول العالم.

كان أنتونيو بفلوجر (Antonio Pflüger) رئيس قسم تعاون تقانة الطاقة، في الـ IEA، القوة المحرّكة وراء هذا المشروع، وعمل دولف جيالن(Dolf Gielen) على النماذج المكتشفة لطاقة التقانة في الـ IEA التي قامت بتزويد أسس بعض المواد في الفصل السابع. وقد ساهم في عدة نقاشات مساعدة.

وقد أمدنا فاتيه بيرول (Fatih Birol) ونيل هيرست (Neil Hirst) وجاسيك بودكانسكي (Jacek Podkanski) وفريدتجوف أناندر (Fridtjof Unader) بملاحظات مهمة جداً.

وقد دعمت جوستين داهل كارلسن (Jostein Dahl Karlsen)، رئيسة مجموعة المشرفين على تقانة النفط والغاز في الـ IEA، المشروع منذ البداية، وزوّدتنا بالإذن للوصول إلى المعطيات والأشخاص. وساهمت كذلك المجموعة التي تعمل على النفط الأحفوري في وكالة الـ IEA وتقانة أبحاث الطاقة بدعم لا يقدّر.

إن أي محاولة لذكر كل الخبراء الذين ساهموا في مستلزمات هذا الكتاب وبالإرشادات سيكون مصيرها الفشل. وإننا نشكر بامتنان توجيه الخبراء التالية أسماؤهم، ونعتذر من الذين لم نذكرهم: توماس البراندت (Thomas (VSGS) Ahlbrandt)، تكاشي أمانو (Takashi Amano) (صناعة ميتسوبيشي الثقيلة)، تور أوستاد (Tor Austad) (جامعة ستفانجر)، منضهر بن حاسين (Mondher BenHassine) (NRCan)، ستيفن تماسيات (Stephen Cassiani) (Exxon Mobil) بول شينغ (Paul Ching) (Shell)، ثوركيل كريستنسن (Thorki Christensen)

(Danish Maritime)، جيم كلارك (Jim Clarke) (BP)، سكوت داليمور (Scott Dallimore) (NR Can)، موريس دوسيولت (Maurice Dussealt) (جامعة واترلو)، آنا إنجر إيد (Anna-Inger Eide) (مديرية النفط النرويجية) وزملاؤها في الـ (NPD)، كارول فيربروذر (Carol Fairbrother) (NR Can)، لين فلينت (Lenn Flint) (Lenef Consulting) مارك فلوريت (Marc Florette) (Gas de Fremce)، بيتر جيرلنغ (Peter Gerling) (معهد علوم الأرض الألماني، BGR)، بير جيرارد غريني (Per Gerhard Grini) (Statoil)، فرانسوا كاليديان (François Kalaydjan) (IFP)، فرتز كروسن (Fritz Krusen) (Conoco Philips)، فكري كوتشك (Fikri Kuchuk) (Shlumberger)، أو يون كون (Oh Yoon Kwon) (Korean Ship Builders) Association)، ريك مارش (Rick Marsh) (Alberta Energy Utilities Board)، ألين موراش (Alain Morash) (Total)، رود نيلسون (Rod Nelson) (Shlumberger)، رالف أودغارد (Ralf Ødegaard) (Statoil)، كينت بيري (Kent Perry) (GTI)، داني سكوربيتشي (Danny Scorpecci) OECD، دايفد سويت (David Sweet) (ILNGA) وبراد وارك (Brad Wark) (NRCan).

يتحمل رئيس المؤلفين المسؤولية الكاملة عن كل الأخطاء المحتملة أو الحذف، بغض النظر عن كلّ هذه المشاركات المهمة.

لقد قامت ماري هاريس وايت (Mary Harries White) بتحرير المؤلّف، وحضر كوريني هايورث (Corinne Hayroth) العرض. شكر خاص إلى كوريني وإلى بيرتراند سادين (Bertrand Sadin) اللتين تألقتا بقيامهما بالمهمة الصعبة من تحضير عدة وسائل إيضاح.

ترسل الملاحظات والأسئلة إلى العنوان الآتي : Antonio.Pflueger@iea.org.

تقديـــــم

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة
ضمن مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي

يطيب لي أن أقدّم لهذه السلسلة التي جرى انتقاؤها في مجالات تقنية ذات أولوية للقارئ العربي في عصر أصبحت فيه المعرفة محركاً أساسياً للنمو الاقتصادي والتقني، ويأتي نشر هذه السلسلة بالتعاون بين مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية والمنظمة العربية للترجمة، ويقع في إطار تلبية عدة سياسات وتوصيات تعنى باللغة العربية والعلوم، ومنها:

أولاً: البيان الختامي لمؤتمر القمة العربي المنعقد في الرياض 1428هـ ـ 2007م الذي يؤكد ضرورة الاهتمام باللغة العربية، وأن تكون هي لغة البحث العلمي والمعاملات، حيث نص على ما يأتي: (وجوب حضور اللغة العربية في جميع الميادين، بما في ذلك وسائل الاتصال، والإعلام، والإنترنت، وغيرها).

ثانياً: «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية» في المملكة العربية السعودية التي انبثق عنها اعتماد إحدى عشرة تقنية استراتيجية هي: المياه، والبترول والغاز، والبتروكيميائيات، والتقنيات المتناهية الصغر (النانو)، والتقنية الحيوية، وتقنية المعلومات، والإلكترونيات والاتصالات والضوئيات، والفضاء والطيران، والطاقة، والمواد المتقدمة، والبيئة.

ثالثاً: مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي التي تفعل أيضاً ما جاء في أولاً عن حضور اللغة العربية في الإنترنت، حيث تهدف إلى إثراء المحتوى العربي عبر عدة مشاريع تنفذها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية بالتعاون مع جهات مختلفة داخل المملكة وخارجها. ومن هذه المشاريع ما يتعلق برقمنة المحتوى العربي القائم على شكل ورقي وإتاحته على شبكة الإنترنت، ومنها ما

يتعلق بترجمة الكتب المهمة، وبخاصة العلمية، ممّا يساعد على إثراء المحتوى العلمي بالترجمة من اللغات الأخرى إلى اللغة العربية بهدف تزويد القارئ العربي بعلم نافع مفيد.

تشتمل السلسلة على ثلاثة كتب في كل من التقنيات التي حددتها «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية». واختيرت الكتب بحيث يكون **الأول** مرجعاً عالمياً معروفاً في تلك التقنية، ويكون **الثاني** كتاباً جامعياً، و**الثالث** كتاباً عاماً موجّهاً إلى عامة المهتمين، وقد يغطي كتاب واحد أو أكثر ذلك مجتمعاً. وعليه، تشتمل سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة على ما مجموعه ثلاثة وثلاثين كتاباً مترجماً، كما خصّص كتاب إضافي منفرد للمصطلحات العلمية والتقنية المعتمدة في هذه السلسلة كمعجم للمصطلح.

لقد جرى انتقاء الكتب وفق معايير، منها أن يكون الكتاب من أمهات الكتب في تلك التقنية، ولمؤلفين يُشهد لهم عالمياً، وأنه صدر بعد عام 2000، وأن لا يكون ضيق الاختصاص بحيث يخاطب فئة محدودة، وأن تكون النسخة التي يترجم عنها مكتوبة باللغة التي ألّف بها الكتاب، وليست مترجمة عن لغة أخرى، وأخيراً أن يكون موضوع الكتاب ونهجه عملياً تطبيقياً يصبّ في جهود نقل التقنية والابتكار، ويساهم في عملية التنمية الاقتصادية من خلال زيادة المحتوى المعرفي العربي.

إن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية سعيدة بصدور هذه المجموعة من الكتب، وأودّ أن أشكر المنظمة العربية للترجمة على الجهود التي بذلتها لتحقيق الجودة العالية في الترجمة والمراجعة والتحرير والإخراج، وعلى حسن انتقائها للمترجمين المتخصصين، وعلى سرعة الإنجاز، كما أشكر اللجنة العلمية للمجموعة التي أنيط بها الإشراف على إنجازها في المنظمة، وكذلك زملائي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الذين يتابعون تنفيذ مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي.

الرياض 20/ 3/ 1431هـ

رئيس مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

د. محمد بن إبراهيم السويل

تمهيـــــد

أعاد ارتفاع أسعار النفط الضوء إلى السؤال القديم، هل نستنزف النفط؟ يعود المتشائمون مرة ثانية إلى نشر الأخبار السيئة على الصفحات الأولى في الصحف الرئيسة. فقد أصبحت أزمة استنفاد النفط الآن جزءاً من حديث عامة الناس تماشياً مع مفهوم أن إنتاج النفط بلغ ذروته الآن، ما يشير إلى دورة من الهبوط الحتمي.

لقد حافظت الـ IEA طوال الوقت على فكرة أن لا شيء من الماضي يدعو إلى القلق، فموارد الهيدروكربونات متوفرة بكثرة حول العالم وستزوده بسهولة خلال انتقاله إلى مستقبل الطاقة الدائمة. ولكن ما نحن بحاجة ماسّة إليه هو استثمار رئيس في المشاريع لاكتشاف موارد هيدروكربونية جديدة، تكون غير تقليدية، أو في أعماق البحار، أو في بعض البلدان التي لم تسمح سياساتها الطبيعية بالاستثمار. وفي الوقت الذي بدأت فيه أسعار النفط المرتفعة اليوم بتحريك رؤوس الأموال، فإن كامل سلسلة الإمداد في صناعة النفط والغاز العظمى قد توسّعت بعد سنوات من الاستثمار المنخفض. وبما أن المشاريع الجديدة تأخذ عدة سنوات لتحقيقها، فإن أسعار النفط المرتفعة ستبقى معنا لعدة سنوات قادمة.

لقد كان التقدم التقني طوال الوقت مفتاحاً لبرهنة خطأ المتشائمين. إننا نتوقع أن التقانة ستقوم مرة ثانية بخفض التكاليف، مؤمنة مردوداً أكثر إغراءً للمستثمرين، وستمهل تطوير موارد جديدة بتكاليف مقبولة، وستسرّع تطبيق المشاريع الحديثة.

يناقش هذا الكتاب توجّهات التقانات الحالية والمستقبلية في أعلى سلسلة (upstream)(*) صناعتي النفط والغاز. ويؤكد أن الاكتشافات المثيرة للاهتمام

(*) الاستكشاف والتنقيب والنقل.

ستكون متزامنة مع إمكانية تحقيق التوقعات حول تأمين طاقة كافية لاقتصاد عالمي متوسع، والحدّ من أثر النفط الأحفوري في المناخ العالمي في الوقت نفسه.

إنه يلقي الضوء على كيفية تمكن الحكومات من المساعدة في خلق الظروف المناسبة لتحقيق الآمال المرجوة من التقانة.

نأمل أن يكون هذا الكتاب مساهمة فعّالة بتوسيع المعرفة حول ماوراء مضخات وأنابيب النفط والإعلام بالحوار الدائر حول مستقبل تزويد الطاقة العالمية.

كلود مانديل ـ المدير التنفيذي

المحتويـــات

الملخـص التنفيـذي 25

المقدمــة 33

الفصل الأول : وضـع الإطـار العـام 37

الطلب على النفط والغاز 37

التوزع الجغرافي 48

نقل النفط والغاز 50

بنية صناعة النفط والغاز 50

البحث والتطوير (R&D) 52

دور التقانة 55

الفصل الثاني : النفط والغاز التقليديان 65

منظمة أوبك في الشرق الأوسط 68

المناطق الأخرى 70

تقانات الحقول الذكية (i-field)
أو الحقول الإلكترونية (e-field) 77

اقتصاديات مقياس الحقول الناضجة 77

الاستخراج المحسّن 79

ما هو الاستخراج؟ 79

التوجهات 80

النفط المتجاوز 82
النفط المتبقي 90
عمليات الاستخراج في الاحتياطيات الكربوناتية 95
ملخص عن الاستخراج المكثّف للنفط 96
موارد تقليدية جديدة: مياه عميقة، القطب الشمالي، الاحتياطيات العميقة 101
المياه العميقة 102
القطب الشمالي 109
احتياطيات الأعماق السحيقة 112

الفصل الثالث : موارد النفط غير التقليدي: النفط الثقيل، البيتومين، الرمال النفطية، الطَفَل النفطي ... 115
النفط الثقيل، البيتومين والرمال النفطية 115
البيتومين القابل للاستخراج 116
النفط الثقيل ذو اللزوجة العالية 118
النفط الثقيل الأسهل انسياباً 119
الطَفَل النفطي 125

الفصل الرابع : موارد الغاز غير التقليدية وهيدرات الميثان 131
الغاز غير التقليدي 131
طبقة الفحم الميثان 131
الغاز المحجوز 135
هيدرات الميثان: موارد المستقبل الطويل الأمد؟ 136

الفصل الخامس : النقـل 141
نقل الغاز 142
الخيارات الناشئة 146
اختناقات النقل البحري للنفط والغاز 154

الفصل السادس : البيئة والسلامة 157
الأثر البيئي 157
غاز الـ CO_2 وتغير المناخ 164
الأمن والسلامة 164

الفصل السابع : وضع القطار على السكة 167
اتجاهات نمذجة تقانة المستقبل 168
تأثير التقانة في إمدادات المستقبل 169
دور الحكومات 177
الاستنتاجات الأساسية 179

الثبت التعريفي 181

ثبت الاختصارات 183

ثبت المصطلحات 185

المراجع 189

قائمة الصناديق

الصندوق 1 «تقليدي» و«غير تقليدي» 42

الصندوق 2 ذروة النفط 61

الصندوق 3 روسيا ودول الاتحاد السوفياتي سابقاً 73

الصندوق 4 المسح الزلزالي رباعي الأبعاد 83

الصندوق 5 المسح الكهرومغناطيسي 85

الصندوق 6 المسح عبر الآبار 85

الصندوق 7 التسجيل خلف التغليف 86

الصندوق 8 دخول الحفر ثانية: الحفر متعدد الجوانب، الحفر الحلزوني 87

الصندوق 9 الاستخراج المكثّف للنفط كيميائياً 90

الصندوق 10 استخراج النفط المكثّف ميكروبياً 95

الصندوق 11 تقويم موارد هيئة المسح الجيولوجي الأميركية،
نمو الاحتياطي والاستخراج المكثّف للنفط 98

الصندوق 12 اتفاقية IEA المطبقة على الاستخراج المكثّف للنفط 101

الصندوق 13 اتفاقية الـ IEA المطبقة حول علوم التدفق متعدد الأطوار 107

الصندوق 14 مساهمة البخار في تصريف الثقالة (SAGD) 122

الصندوق 15 أساسيات تسييل الغاز 147

الصندوق 16 التوهج : حالة خاصة من الغاز المحجوز 151

الصندوق 17 مثال على التطورات الحديثة : وايتش فارم 161

الصندوق 18 مثال عن التطورات الحديثة 163

الصندوق 19 منحنيات الكلفة ومنحنيات التعلم 172

قائمـة الأشكـال

الشكل 1 ـ ES : شكل توضيحي يُبيّن تكلفة النفط، متضمناً تطور التقانة: وجود الموارد النفطية بدلالة السعر الاقتصادي 31

الشكل 0 ـ 1 : متطلبات تراكم استثمار النفط العالمي المطلوب، 2003 ـ 2030 34

الشكل 0 ـ 2 : احتياجات تراكم استثمار الغاز الطبيعي العالمي، 2003 ـ 2030 35

الشكل 1 ـ 1 : الطلب العالمي الأولي للطاقة على مرّ الوقت في سيناريو الـ IEA المرجعي 38

الشكل 1 ـ 2 : نسبة المساهمة المئوية للنقل في الطلب العالمي على النفط، نسبة المساهمة المئوية للنفط في نقل الطاقة المطلوبة 38

الشكل 1 ـ 3 : مثال عن لباب صخرية تحمل نفطاً 40

الشكل 1 ـ 4 : طبقات رسوبية نموذجية تحمل نفطاً أو غازاً 40

الشكل 1 ـ 5 : موارد الهيدروكربون في العالم 41

الشكل 1 ـ 6 : تصنيف موارد الهيدروكربونات 45

الشكل 1 ـ 7 : النفط الخام والاحتياطي من الغاز الطبيعي المُسيّل (NGL) في نهاية عام 2003 47

الشكل 1 ـ 8 : تطور احتياطي النفط المؤكد بعامل الزمن 47

الشكل 1 ـ 9 : الاحتياطي المؤكد عالمياً من الغاز الطبيعي بتريليون الأمتار المكعبة 48

الشكل 1 ـ 10 : توزع الاحتياطي المؤكد من النفط التقليدي، طبقاً لمصادر عديدة، بنسب مئوية 49

الشكل 1 ـ 11 : منظمة الأوبك، ونسبة مساهماتها شرق الأوسطية في تزويد إمداد النفط العالمي 49

الشكل 1 ـ 12 : تدفق النفط ونقاط الاختناق الرئيسة لعام 2003 50

الشكل 1 ـ 13 : الإنفاق في أعلى سلسلة الإنتاج على البحث وتطوير النفط والغاز 53

الشكل 1 ـ 14 : إنفاق الشركات الكبرى على البحث والتطوير 54

الشكل 1 ـ 15 : من كوخ خشبي. 56

الشكل 1 ـ 16 : . . . إلى منصة الحفر والإنتاج في بحر الشمال 57

الشكل 1 ـ 17 : من الورق إلى الغوص ثلاثي الأبعاد 58

الشكل 1 ـ 18 : . . . من الأنبوب الخشبي 59

الشكل 1 ـ 19 : . . . إلى حاملات الغاز الطبيعي المسيّل 59

الشكل 1 ـ 20 : تأثير تطبيق التقانة في الإنتاج من بحر الشمال، آلاف البراميل في اليوم 60

الشكل 1 ـ 21 : الشكل النظري لكمية النفط المكتشف بدلالة الزمن 61

الشكل 1 ـ 22 : اكتشافات النفط السنوية وإنتاجه للولايات المتحدة بنهاية 48 62

الشكل 2 ـ 1 : إنتاج النفط العالمي بحسب المورد مقدّراً بمليون برميل في اليوم 65

الشكل 2 ـ 2 : عروض نتاج شركة إيكسون موبيل 66

الشكل 2 ـ 3 : النفط الدولي التقليدي القابل للاستخراج بشكل نهائي مقدّراً بمليار برميل 67

الشكل 2 ـ 4 : الغاز الدولي التقليدي القابل للاستخراج بشكل نهائي مقدراً بمليار مكافئ برميل نفطي 68

الشكل 2 ـ 5 : تأثير التقانة في الكلفة في مياه الولايات المتحدة 71

الشكل 2 ـ 6 : مثال لبناء بئر تقليدية يوضح تناقص القطر مع العمق 75

الشكل 2 ـ 7 : مخطط للتغليف (أزرق) وسّع بواسطة آلة توسيع سحبت من الأسفل إلى الأعلى 76

الشكل 2 ـ 8 : معدات جديدة لخدمات الإتمام المتكاملة 78

الشكل 2 ـ 9 : نفط غير مستخرج متروك في حقول الولايات المتحدة 81

الشكل 2 ـ 10 : تطور عامل الاستخراج المتوقع في النرويج 81

الشكل 2 ـ 11 : النفط المتجاوز 83

الشكل 2 ـ 12 : صورة زلزالية ثلاثية الأبعاد (3D) لرَسوبيّات نهرية على عمق 3000 متر تحت السطح 84

الشكل 2 ـ 13 : شكل تخطيطي لآبار متعددة الجوانب 88

الشكل 2 ـ 14 : وحدة أنبوبية ملفوفة 89

الشكل 2 ـ 15 : النفط المتبقي المتروك في مسامات صغيرة بعد إزاحة الماء للنفط من المسامات الكبيرة (تعريف صوّري) 92

الشكل 2 ـ 16 : التوجه في حقن غاز الهيدروكربون من أجل استخراج مكثّف للنفط في النرويج 94

الشكل 2 ـ 17 : الكلفة المتوقعة لمختلف طرائق الاستخراج المكثّف للنفط بالدولار الأميركي عام 1990 لكل برميل 97

الشكل 2 ـ 18 : دالة النمو الاحتياطي لهيئة المسح الجيولوجي الأميركية 100

الشكل 2 ـ 19 : النفط التقليدي القابل للاستخراج عالمياً بشكل نهائي (كما في الشكل 2 ـ 3) مع انقطاع في النفط غير المكتشف، وإضافة إمكانية استخراج النفط المكثّف 102

الشكل 2 ـ 20 : الإمكانية المستقبلية للنفط والغاز في المياه العميقة في العالم 103

الشكل 2 ـ 21 : تطور تقانة المياه العميقة 104

الشكل 2 ـ 22 : التحديات التقانية الأساسية للمياه العميقة والعميقة جداً 106

الشكل 2 ـ 23 : تطور عمليات المياه العميقة، من المنشآت السطحية الكبيرة إلى تقانات تحت قاع البحر 106

الشكل 2 ـ 24 : تأثير كلفة تطور التقانة بعيداً عن الشاطىء في القطاع النرويجي لبحر الشمال 108

الشكل 2 ـ 25 : أثر التقانة في جعل التراكمات الهيدروكربونية أصغر وأبعد عن المنصات الموجودة بشكل اقتصادي 109

الشكل 2 ـ 26 : مساهمة القطب الشمالي في موارد النفط والغاز غير المكتشفة 110

الشكل 2 ـ 27 : أخطار القطب الشمالي 111

الشكل 2 ـ 28 : حلول للنقل الحديث في بحار القطب الشمالي 112

الشكل 2 ـ 29 : تقويمات موارد الهيدروكربون بدلالة عمق الدفن 113

الشكل 2 ـ 30 : خريطة لسَماكات الرسوبيّات بالكيلومتر 114

الشكل 3 ـ 1 : موارد النفط الثقيل في العالم 117

الشكل 3 ـ 2 : تكشف الرمال النفطية في كندا 117

الشكل 3 ـ 3 : كلفة إنتاج النفط من الرمال الكندية 118

الشكل 3 ـ 4 : عرض تخطيطي لتصريف الجاذبية بمساعدة البخار 123

الشكل 3 ـ 5 : عرض تخطيطي لتصريف الجاذبية بمساعدة البخار (SAGD) ـ مقطع عرضي 124

الشكل 3 ـ 6 : يبلغ مجمل توزع الطَفَل النفطي حول العالم 1060 مليار برميل من النفط القابل للاستخراج 126

الشكل 3 ـ 7 : بنية كلفة مشروع طَفَل ستيوارت النفطي المقترح في أستراليا 127

الشكل 4 ـ 1 : إنتاج غاز ميثان طبقة الفحم في الولايات المتحدة، بالحوض 133

الشكل 4 ـ 2 : موارد ميثان طبقة الفحم في الولايات المتحدة ـ 20 تريليون متر مكعب 134

الشكل 4 ـ 3 : بنية هيدرات الميثان المشابهة للجليد، مع ذرة ميثان في قفص من ذرات الماء 137

الشكل 4 ـ 4 : سيطرة وجود الهيدرات بدلالة الضغط والحرارة 138

الشكل 4 ـ 5 : خارطة وجود هيدرات الميثان المؤكد 139

الشكل 5 ـ 1 : تقانة جديدة لإعادة التحويل إلى غاز قبالة الساحل 143

الشكل 5 ـ 2 : تخفيض في نفقات النقل بالأنابيب مع مرور الزمن 144

الشكل 5 ـ 3 : خط أنبوب مدعم ومركب طور من قبل Transcanda 144

الشكل 5 ـ 4 : تطور كلفة رأس المال لمنشآت تسييل الغاز بالدولار الأميركي لكل برميل يومياً 149

الشكل 5 ـ 5 : نموذج أولي لمنشأة تسييل الغاز على نطاق ضيق 150

الشكل 5 ـ 6 : تقويم كميات الغاز المتوهج (المشتعل) مقدراً بمليار متر مكعب في السنة 153

الشكل 5 ـ 7 : تطبيقات تقانات نقل الغاز المختلفة 154

الشكل 6 ـ 1 : نمط إنتاج النفط في حقبة العشرينيات في حقول نفط باكو، أذربيجان 158

الشكل 6 ـ 2 : منشآت إنتاج النفط في بداية القرن العشرين (1900) حقل وايتش فارم (Wytch Farm) المملكة المتحدة 159

الشكل 6 ـ 3 : اتجاهات في مؤشرات التأثير البيني الرئيس 160

الشكل 6 ـ 4 : استغلال كميات أكبر من الاحتياطيات النفطية مع أثر سطحي أصغر في ألاسكا 162

الشكل 6 ـ 5 : تخفيض آثار موقع الحفر في ألاسكا 162

الشكل 7 ـ 1 : منحنى تكلفة النفط، يتضمن التطور التقني: توفر موارد النفط بدلالة السعر الاقتصادي 171

الشكل 7 ـ 2 : منحى تكلفة النفط، عرض بديل المعطيات نفسها في شكل 7 ـ 1 172

الشكل 7 ـ 3 : الكلفة المتزايدة لاكتشاف وتطوير وإنتاج موارد نفط وغاز جديدة في الولايات المتحدة 173

الشكل 7 ـ 4 : منحنيات تكلفة النفط والغاز والفحم من روغنر 175

الشكل 7 ـ 5 : منحنيات التكلفة للنفط غير التقليدي من غرين 176

الشكل 7 ـ 6 : منحنيات تعلم رمال النفط الكندية ـ سجل الكلفة مقابل سجل تراكم الإنتاج 177

الملخــص التنفيــذي

سيستمر اعتماد العالم لعقود قادمة بشكل كبير على التزود الضخم بالنفط والغاز طبقاً لطلب العروض من وجهة نظر منظمة الطاقة العالمية (WEO) في سيناريو الـ IEA. إن مساهمة هذين النوعين من الوقود في مزيج وقود الطاقة العالمية سيزداد من حوالى 57 في المئة في عام 2002 إلى حوالى 60 في المئة في عام 2030، في حال عدم تغير سياسات الطاقة العالمية.

سيزداد الطلب على النفط والغاز نتيجة لذلك بما يقارب 70 في المئة خلال هذه العقود الثلاثة. حتى ولو اتخذت الحكومات خطوات أكثر صرامة لتوجيه الاهتمامات البيئية وسلامة الطاقة كما نُمذِج في دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** (*World Energy Outlook*)(*) في السيناريو البديل للـ IEA، فسيكون الطلب على النفط العالمي أقل بـ 11 في المئة فقط من عروض سيناريو الـ IEA، وسيكون الطلب على الغاز أقل بـ 10 في المئة فقط. بالإضافة إلى ذلك، ونتيجة للانحدار الحتمي لموارد الإنتاج الموجودة عالمياً، والذي من الممكن أن يصل إلى حوالى خمسة في المئة في السنة، فإن هذا الانحدار سيحتاج إلى التعويض بإمدادات جديدة.

إن موارد الهيدروكربون الموجودة في أماكن عديدة حول العالم وفيرة بما فيه الكفاية لدعم النمو المرجّح في نظام الطاقة العالمية. ولكن مع تزايد الطلب الحالي للمشاريع فإن الحفاظ على التوازن سيُرغم صناعة الهيدروكربون بأن تأخذ مجموعة من الأعمال المتنوعة والتحديات التقانية. وهذا يعود بشكل كبير إلى وجود طلب أكثر على التقانات في المستقبل لتطوير ما تبقى من موارد النفط والغاز وإحضارها إلى الأسواق مما كان عليه الوضع في الماضي.

(*) نشرة دورية تصدرها وكالة الطاقة الدولية تحمل تحليل سوق الطاقة العالمية على المدى البعيد.

إن تأكيد الشروط الصحيحة من أجل تنمية وتسريع التطور التقاني في قطاع أعلى سلسلة الإنتاج للنفط والغاز سيكون العامل الرئيس للنجاح في توفير الأمن العالمي من أجل تزويد كل الدول.

الهدف من هذا الكتاب هو:

- استعراض حاجات المستقبل للتحسينات التقانية لمواجهة التحديات التي تتعرض لها صناعة الهيدروكربونات في القرن الحادي والعشرين.
- مناقشة التطبيقات السياسية الراسخة.
- قياس الأثر الذي يمكن أن يتركه التقدم التقاني في توفر موارد الهيدروكربون المستقبلية.

التحديات الكبيرة للمستقبل

يوجد حوالى 10 تريليونات برميل من النفط والغاز التقليدي مقاساً في وحدات من مكافئ برميل نفطي (BOE)(*). ويوجد في الأقل الكمية نفسها من النفط والغاز غير التقليدي أيضاً. من مجموع الـ 20 تريليون مكافئ برميل نفطي هذه يمكن تقنياً اعتبار من 5 إلى 10 تريليونات متاحاً من الناحية التكنولوجية. ولكن من الناحية الاقتصادية، فإن هذه الكمية غير قابلة للاستخراج بالضرورة. ويعتمد ذلك على معدل الاستخراج وعلى التطور التقاني والأسعار المعلنة على المدى البعيد.

إن كمية الاحتياطي المؤكد هي حوالى 2,2 تريليون مكافئ برميل نفطي. وهذه الكمية ليست بعيدة عن الـ 1,5 تريليون من مكافئ برميل نفطي المنتجة حتى الآن على مدى أكثر من 100 سنة من الاستثمار. وتعتبر الـ 1,5 تريليون من مكافئ برميل نفطي في الحقيقة كمية تقريبية مما نحتاج إلى إنتاجه خلال الـ 25 سنة القادمة.

ولكن الحاجة الملحة من أجل الحصول على موارد تقليدية وغير تقليدية

(*) مكافئ برميل نفطي (بالإنكليزية BOE = barrel of oil equivalent) هي وحدة طاقة تعتمد بالتقريب على الطاقة الناتجة من احتراق برميل واحد (159 ليتر) من النفط الخام. ويعادل مكافئ برميل النفط 5.8×10^6 (وحدة حرارية بريطانية. وذلك القدر يُعتبر تقريباً لمقدار الطاقة، لأن النفط الخام أنواع تختلف في مقدار الطاقة الحرارية الناتجة من احتراقها.

سيفرض متطلبات اعتبارية على القطاع البشري وعلى القدرات الفكرية والمالية. وستستمر موارد النفط والغاز التقليدي بالسيطرة على إمداد العالم بالنفط والغاز خلال الفترة حتى 2030. إن الأساس المتوفر للاستثمار أو للاحتياطيات المعروفة سيقدم حصة الأسد من الإمداد المستقبلي من الهيدروكربون التقليدي. ومع ذلك، فإن مخرجات منحنيات انحدار الإيراد المتراجع، والحاجة إلى التنمية الاقتصادية لحياة الحقل من خلال تخفيض وتحسين طرائق الاستخراج، تقدم تحديات جسيمة في هذا المضمار. إن متوسط معدل الاستخراج التقريبي من النفط هو حوالى 35 في المئة. ويمكن للتقدم التقاني أن يرفع هذه النسبة فعلياً. ويمكن لزيادة استخدام غاز الـ CO_2 لاستخراج النفط المحسّن أن يزيد في الوقت نفسه عوامل الاستخراج ويضبط انبعاثات الغازات الدفيئة في الجو. من جهة أخرى، تصل معدلات استخراج الغاز عالمياً، نتيجة لذلك، بشكل وسطي إلى حوالى 70 في المئة. ولذلك، فإن معدلات الاستخراج المحسنة ليس لديها أهمية الغاز كما هو الحال للنفط.

إذا كانت الإمدادات المستقبلية من النفط والغاز التقليديين ستتسع، فإنه من الضروري التوصل إلى وسيلة للوصول إلى الموارد في المناطق التي تحتاج إلى تقانة بشكل أكثر، مثل:

- المياه العميقة والعميقة جداً.
- الاحتياطيات المدفونة في الأعماق والأكثر تعقيداً.
- مناطق القطب الشمالي التي تعتبرها الحكومات مرغوباً فيها.
- الأحواض القليلة المتبقية والنائية غير المستكشفة.
- البقايا المأمولة مع تراكمات أقل في المناطق المعروفة.

ستكون المتطلبات المعروضة من أجل الإمداد بالغاز الطبيعي، في مجال الاستثمار، قريبة من تلك المتطلبات الخاصة بالنفط في الثلاثين سنة القادمة. في الحقيقة، إن تزايد الطلب على الغاز سيتفوق على الطلب على النفط. بالإضافة إلى ذلك، فإن نقل الغاز باستمرار إلى الأسواق البعيدة يكلف أكثر من نقل النفط. وفيما تنبع نداءات الشركات الكبرى من أجل رأس المال لتحريك النفط من التنقيب عن والإنتاج والتكرير، فإن الاستثمار في إمدادات الغاز سيتركز أساساً على البنية التحتية للنقل، وذلك من أجل إشباع السوق المتنامية بسرعة.

إن التقانات الجديدة مطلوبة لكي تعطينا حلولاً أكثر فاعلية بأقل كلفة، ويُعتبر الغاز الطبيعي المسيّل (NGL) إحدى هذه الخيارات التي ستؤدي دوراً كبيراً في خدمة الأسواق العالمية إذا ما استُحدثت.

في هذه الأثناء، يعدّ الاستغلال المكثّف لموارد معروفة للنفط والغاز غير التقليديين بإنتاج إمدادات كبيرة جداً لكلا الوقودين. وقد أكسبهما الانحدار الملحوظ في كلفة استخراج وإنتاج هذه الموارد في العقدين الماضيين موقعاً كبيراً في السوق. وسيتطلب تعزيز حصص خليط الوقود النسبي من موارد النفط والغاز غير التقليديين في عالم الطاقة المستقبلي استثمارات كبيرة في قدرات الإنتاج والتوزيع، وفي تطوير واستخدام تقانات أكثر فاعلية. ويمكن أن تؤدي سياسات الحكومة المشجعة لاستثمار كهذا دوراً مهماً.

إذا أخذنا الامتداد العريض للتحديات في الاعتبار، فسيتطلب توسع الإمداد العالمي للموارد التقليدية وغير التقليدية تحسينات في التقنيات الأساسية وفي القاعدة العلمية المتعلقة بها، وذلك من أجل تعزيز:

- مهارات الصناعة التقنية لمواجهة المتطلبات المعروضة.
- تخفيضات أكبر في كلف الاستخراج.
- معالجة ناجحة للتحديات الاقتصادية الأكثر إلحاحاً ومخاطر استثمارات أعلى سلسلة الإنتاج.

مرتكز الدراسة

تلقي هذه الدراسة نظرة تفصيلية لتحديد نوع التقدم التقاني المطلوب من أجل تعزيز إمدادات النفط والغاز المستقبلية. وقد فُحص هذا السؤال في مجال التقانة الجوهرية، وفُحص كذلك في مجال الدور الذي ستقوم به كل من الصناعة والبحث العلمي والبيئة الأكاديمية والحكومات من أجل تعزيز التقدم التقني للصناعة.

في ما يأتي يُلقى الضوء بشكل رئيس على هذه المجالات التقانية من أجل تعزيز الإمدادات المستقبلية:

- قابلية محسنة لوصف تغيرات الاحتياطي النفط، وتصور حركات السوائل، وبخاصة في الاحتياطيات الكربونية الكبرى.
- آبار قليلة الكلفة.

- مجموعة من المعلومات ذات أساس تقاني، أنظمة حقول الكترونية ذكية (e-field) تسمح بإدارة شاملة للاحتياطيات.
- نهج انسيابي وقياسي بشكل أكبر، ذو نظام تجميعي متسلسل، يمكن تطبيقه في كلّ عمليات حقول النفط والغاز.
- التشديد المتجدد على تقانات محسنة لاستخراج النفط مقدمة بشكل أفضل تشتمل على استخدام غاز الـ CO_2 للجمع بين استخراج النفط وتقليل تغيرات المناخ.
- تحسين تقانات المياه العميقة لضمان قابلية التطبيق على عمق يصل إلى حوالى 4000 متر.
- تقانات من أجل عمليات آمنة وسليمة بيئياً في مناطق القطب الشمالي.
- تقانات من أجل إنتاج اقتصادي للموارد غير التقليدية وبشكلٍ خاص: النفط الثقيل، البيتومين، الطَفَل النفطي والغاز التقليدي.
- تقانات لتخفيف آثار عمليات النفط والغاز على البيئة.
- تقانات وتحركات لتسهيل اختناقات عملية الشحن البحري.
- تقانات تعزز الاحتياطات الأمنية للمنشآت.

ويتم كذلك دراسة معظم التطورات الصناعية الجارية في كل هذه المجالات وتلخيصها.

الاستنتاجات الأساسية والتوصيات:

إن المشكلة الأساسية ليست محدودية الموارد الجيولوجية، إذ إن القضايا الجوهرية اليوم تتمحور حول التقانات والأسعار والسياسات التي ستجعل موارد العالم الضخمة قابلة للاستخراج من الناحية الاقتصادية وتحويلها إلى احتياطي مؤكد.

سيكون من الضروري في البداية تحريك بعض الاستثمارات واسعة النطاق والمقدرة بحوالى 5 تريليونات دولار أميركي خلال العقود الثلاثة القادمة[1].

(1) متطلبات عملية استثمار النفط والغاز المطروحة غير مناقشة على أي مستوى في هذه الدراسة، إن =

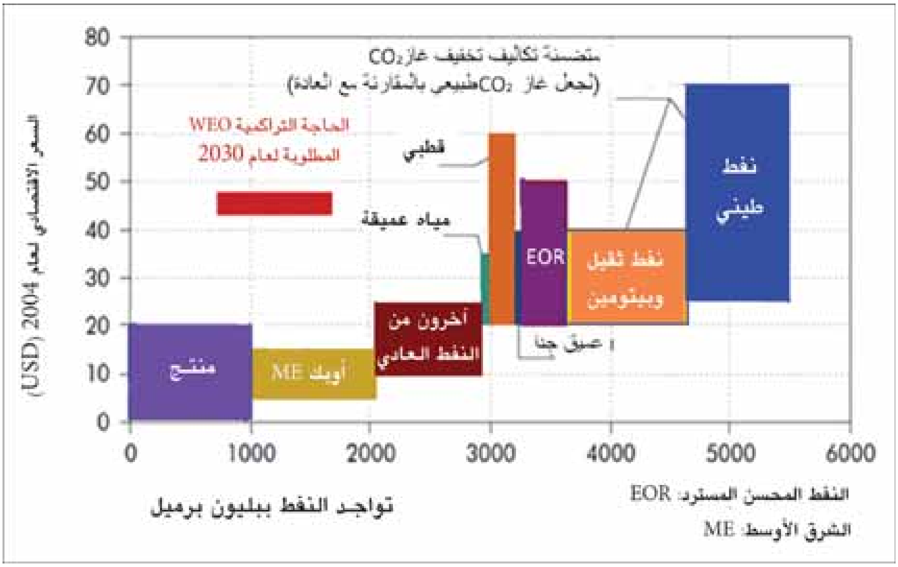
ومن ثمّ، فإننا سنحتاج إلى جهود البحث والتطوير المحددة والموسّعة في التقانات المطلوبة. ويبدو بوضوح أن الصناعة تملك الطرائق والمقدرات والحوافز من أجل تقديم البحث والتطوير المطلوبين. وستكون القياسات التي تشجع هذه الجهود مفيدة، ويمكن للسياسة الشعبية أن تؤدي دوراً أساسياً في طرق عديدة وبصورة ملحوظة بالتركيز على ما يأتي:

- تأمين إطار مواتٍ للاستثمار في موارد جديدة، بما في ذلك الترخيص المناسب والضرائب وحقوق الملكية ودعم إدارة المشاريع. وقد أظهرت التجارب أنَّ هذه الأمور يمكن أن تكون أداة مساعدة في تسريع تعلّم التقانة المطلوبة لجعل الموارد غير التقليدية منافسة.
- وجود مناخ سياسي يؤمن نشاطاً تعاونياً مستمراً بين مطوري التقانة في دول الـ IEA ومالكي موارد الهيدروكربون في دول الأوبك.
- أخذ المبادرة في تعزيز تطوير التقانة وتسهيل الاستثمارات التي تقلل الاختناقات في عمليات الشحن.
- المساهمة الفعالة في تطوير وتسهيل تطبيق التقانات التي تحسن إجراءات السلامة في المنشآت.
- التأكد أن معدل تخفيض كمية CO_2 المنبعثة في الجو كافية من أجل تعزيز مجال أوسع لاستخراج مكثّف للنفط يؤدي إلى معدلات استخراج أعلى.
- دعم العلوم الأساسية في مجال الأنظمة البكتيرية الجوفية الخاصة بعلم الأحياء والبيئة، إذ إنه بإمكان هذا الأمر أن يُحدث فرقاً في استخدام التقانات الحيوية في مجال تحسين الاستخراج أو في مجال تحويل الهيدروكربونات الثقيلة.
- الدعم الحذر لجهود الصناعة في تقليل آثارها في البيئة وذلك من أجل مباشرة الاستفادة من موارد المناطق الجديدة.

= نسبة الـ 5 تريليون دولار أميركي اللازمة لعمليات أعلى سلسلة الإنتاج، بما في ذلك عملية النقل، هي من تحليلات تم القيام بها في دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004.

■ الاستمرار في متابعة تحسينات العلوم والتقانة المتصلة بالاستخدامات المستقبلية لمخزونات الميثان المائية مع التشديد على مشاركة قوية من قبل الصناعة. إن هذه الموارد، في الأغلب، مهمة جداً لإمدادات طويلة الأمد، غير أنها غير ملائمة حالياً للاعتماد عليها لوحدها في مجال مساهمات الصناعة.

لقد توصلنا من خلال مناقشة خبراء الصناعة عن أثر تقانات المستقبل إلى منظور مشترك في الإتاحة المستقبلية لأنواع عديدة من الموارد، بدلالة أسعار النفط، مع الأخذ بعين الاعتبار التطور التقاني المرجّح. وقد مُثل هذا المنظور بيانياً في الشكل 1 ـ ES. ويُظهر الشكل أسعار النفط المتعددة (Brent) التي تجعل استغلال كميات متنوعة من موارد مختلفة خياراً متاحاً من الناحية الاقتصادية. وقد أُخذت في الحسبان كلفة ضبط وتخزين غاز الـ CO_2 المنبعث خلال عملية استخراج النفط غير التقليدي.



الشكل (1 ـ ES): شكل توضيحي يُبيّن تكلفة النفط، متضمناً تطور التقانة: وجود الموارد النفطية بدلالة السعر الاقتصادي

محور x يمثل النفط المتراكم الذي يمكن الوصول إليه، ومحور y يمثل التكلفة التي تجعل كل نوع من الموارد اقتصادياً.

المصدر: : وكالة الطاقة الدولية (IEA).

ترتكز معظم الشركات حالياً في قراراتها الاستثمارية على أسعار طويلة الأمد من 20 إلى 25 دولاراً أميركياً لكل برميل. يفترض الشكل أن قبول الأسعار طويلة الأمد، مثلاً، 30 دولاراً أميركياً للبرميل سيؤدي إلى اختلافات معتبرة في قابلية الاستخراج الاقتصادية لكميات كبيرة من النفط.

يركز التحليل هنا على النفط فقط حيث يمثل الاستخراج الكلفة الغالبة. أما بالنسبة إلى الغاز، فالاحتياطي متوفر بكثرة، وتغلب كلفة النقل على النواحي الاقتصادية. وستحدد عملية تطوير الغاز الطبيعي المسيّل وتقانات النقل الأخرى معادلة الإمدادات المستقبلية.

المقدمـــــة

سوف يستمر النفط والغاز بأداء الدور الرئيس في إمداد الطاقة إلى دول الـ IEA وإلى العالم بشكل عام خلال النصف الأول من هذا القرن. وقد أجمعت على هذه النظرة عدة دراسات لأسواق الطاقة المأمولة بما في ذلك الـ IEA ودورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية**. وتفترض توقعات هذه الدراسات استمرار قابلية صناعة النفط والغاز بإنتاج الهيدروكربونات بالكميات المطلوبة في ظل سيناريوهات السعر المتعددة المستخدمة في كل دراسة. وبالرغم من أن النماذج المختلفة تستخدم طرائق مختلفة، غير أن افتراضاتهم العامة تبنى بشكل أساسي على استيفاء سجل الصناعة لكلٍّ من اتساع الاحتياطي وعمليات الاستخراج والإنتاج.

تعتمد اتجاهات الدعم لإنتاج كهذا على ثلاثة عوامل رئيسة:

■ **استثمار رأس مال كافٍ** في التنقيب، والآبار، ومرافق الإنتاج، والنقل، ومصانع المعالجة، ومصافي التكرير. إن أهمية استثمار رأس مال كهذا قد تم عرضه في مختلف مطبوعات الـ IEA خلال السنوات الحالية كما هو موضح في الشكلين 0 ـ 1 و0 ـ 2.

■ **موارد بشرية مؤهلة بشكل كافٍ**: هذا هو التحدي الرئيس للصناعة بشكل عام. فقد شوّهت التجارب العديدة لخفض العمالة التي نفذتها شركات نفطية في السنوات العشرين الماضية، هرم الصناعة العمري، وسيصل عدة اختصاصيين إلى سن التقاعد في العشر سنوات القادمة. وتبدو صورة الصناعة أقل جاذبية للشباب المثقفين من الصناعات «الخضراء» الأخرى، بشكل خاص في دول الـ IEA. وفي الوقت نفسه، ونتيجة انتقال الإنتاج من الدول الصناعية إلى الدول النامية، ونتيجة الرغبة المشروعة لدعم القوى العاملة المحلية في دول كهذه، أصبح ملحّاً الآن أن يتم تدريب عدد كبير من المتخصصين الشباب من جنسيات مختلفة. ويُعتبر التزويد بطاقم ذي مهارة عالية تحدياً متعارفاً عليه

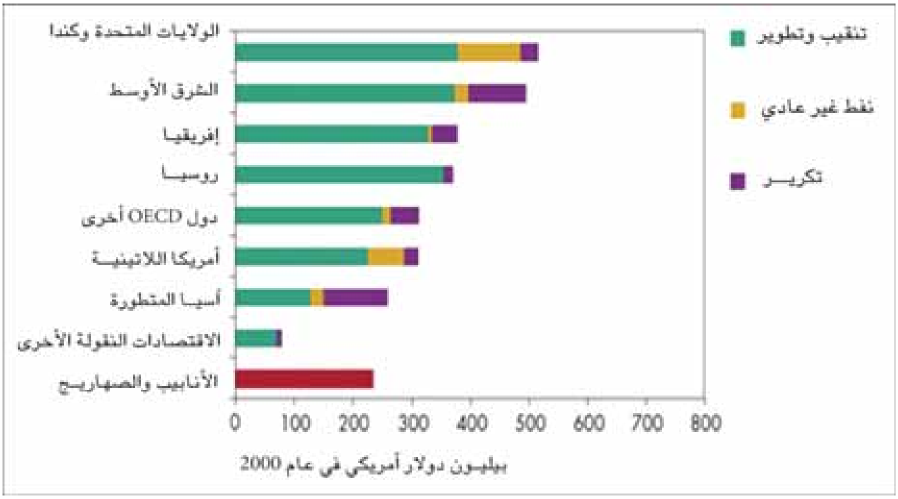
في دوائر إدارة الصناعة، وأحد الأمور التي ذكرها كثير من الفاعلين المختلفين.

رغم أن هذا الموضوع لم يناقش في هذه الدراسة، ولكن من المفيد التأكيد أن جذب وتدريب عدد كافٍ من المتخصصين الموهوبين سيكون حاسماً لأمن الإمداد في حال بقاء النفط والغاز العنصرين الأهم في استخدام الطاقة في دول الـ IEA.

■ **التطور التقاني المستمر**: تفترض معظم التصورات مستويات مختلفة من التطور المستدام في التقانات من أجل توسيع الاحتياطي القابل للاستخراج في الحقول المعروفة أو من أجل تطوير حقول جديدة ذات تحدٍ أكبر. وقد اعتمدت هذه التصورات بشكل كبير على استقراء اتجاهات الصناعة الماضية. ومع ذلك، هناك ثلاثة أسباب تدعو إلى إعادة دراسة هذه الفرضيات.

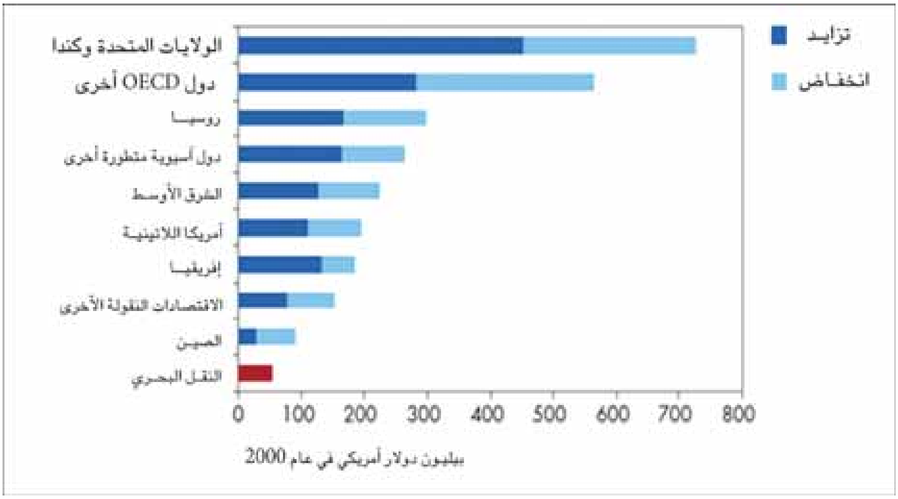
● بما أن تحركات الصناعة اتجهت أكثر فأكثر إلى ترسّبات النفط والغاز ذي التحدي الأكبر، فإن خطى التطور التقاني بحاجة إلى تسارع ملحوظ، إذا ما أردنا الحصول على اتجاهات الإنتاج الماضي نفسها.

● مع أن تقدم التقانة يبدو مستمراً عندما يُحسب معدله الوسطي على مرّ الزمن، إلا أن تقدماً فعلياً كهذا يأتي بخطى متميزة كلما انتشرت تقانات جديدة ناجحة. كما لا توجد ضمانة بأن التقانات الرئيسة المطلوبة ستظهر في الوقت الملائم لتجعل بعض الإمدادات الجديدة متاحة، كما خُطّط لها في نماذج المشروع.



الشكل (0 ـ 1): متطلبات تراكم استثمار النفط العالمي المطلوب، 2003 ـ 2030

المصدر: WEO-2004, IEA.



الشكل (0 ـ 2): احتياجات تراكم استثمار الغاز الطبيعي العالمي، 2003 ـ 2030

المصدر: WEO-2004, IEA.

● يحتاج التطور التقاني أيضاً إلى استثمار، وغالباً إلى استثمار بعيد المدى. وقد أدى تذبذب الأسعار الواسع خلال السنوات الخمس والعشرين الماضية إلى استثمارات معتدلة نسبياً في البحث والتطوير في صناعة النفط والغاز. وتتجه هذه الاستثمارات نحو التأجيل في ظل غياب أفق تخطيطي مستقر ما يؤدي إلى تقويض قابلية الصناعة لضمان إنتاج خلال الجدول الزمني المطلوب. وفي الحقيقة، يمكن أن نجادل بأن بعض التطور التقني الهائل المشاهد في صناعة النفط والغاز خلال التسعينيات كان نتيجة الإنفاق الكبير على البحث والتطوير في نهاية سبعينيات وأوائل ثمانينيات القرن العشرين، وقد أدى ذلك إلى خفض الإنفاق على البحث والتطوير في تسعينيات القرن نفسه. ومن الممكن أنه أغلق دوراً أبطأ من التطور.

لذلك فإن تأكيد الشروط من أجل استمرار التطور التقاني السريع في صناعة النفط والغاز سيكون المتطلب الرئيس من أجل ضمان إمداد دول الـ IEA.

تشتمل أعلى سلسلة إنتاج صناعة النفط والغاز (التنقيب، والإنتاج، والنقل) على عدد كبير من التقانات، تتطور كل منها باستمرار. وبالطبع فإن هذا الكتاب ليس مجالاً لنقاش التطور المستقبلي لكل تقانة من التقانات المتقدمة. إلا أن عدداً كبيراً من المنشورات المتخصصة الموجودة تتناول هذا الموضوع

من حيث علاقته بفروع الصناعة المختلفة. وسنركز هنا على أثر مناطق التقانة الرئيسة، وعلى ضمان الإمداد المستقبلي.

إن اختيار هذه المناطق يعني، بالطبع، صنع خيارات أمام الكثير من اللايقين. وقد أظهر الماضي بأن الصناعة النفطية والغاز كانت نشيطة جداً في دفع ملف التقانة، غير أنها شكّلت خطراً نسبياً معاكساً. وبالنتيجة، فإن التغيير يأخذ وقتاً. وتعمل فرق البحث والتطوير لفاعلي الصناعة الرئيسين على تقانات من المرجح أن تؤدي إلى تغير أساسي في الصناعة قبل العام 2030. وهنالك ثمة مفاجآت يُؤمل التوصل إليها، إلا أنه من المرجح أن يعطيها اختيار التقانات مجالاً واسعاً للخطأ. ولو طُلب منهم تحديد التقانات الرئيسة التي أدت إلى تغيير في صناعة النفط والغاز خلال السنوات الخمس والعشرين الماضية، فإن معظم المراقبين سيشيرون إلى المسح الزلزالي ثلاثي الأبعاد وإلى الآبار الأفقية. غير أن نظرة سريعة إلى المجالات التقنية منذ خمس وعشرين سنة مضت، أي ثمانينيات القرن الماضي، تظهر أنه فيما كان المسح الزلزالي ثلاثي الأبعاد والآبار الأفقية كانت في الأفق، فإن معظم استثمارات البحث والتطوير كان مخصصاً لتقانات الاستخراج المكثّف للنفط كيميائياً، أو لاستثمار الطَفَل النفطي. ولم يرشح، بشكل أساسي، أي أثر تجاري حتى اليوم. وربما يرغب القرّاء بالاحتفاظ باللايقين هذا في أذهانهم.

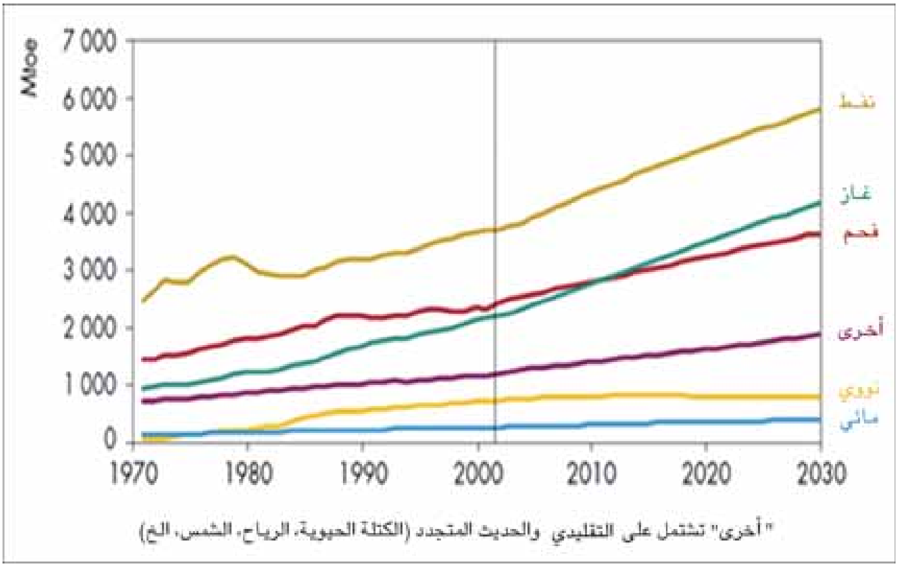
الفصل الأول

وضـــع الإطـــار العـــام

الطلب على النفط والغاز

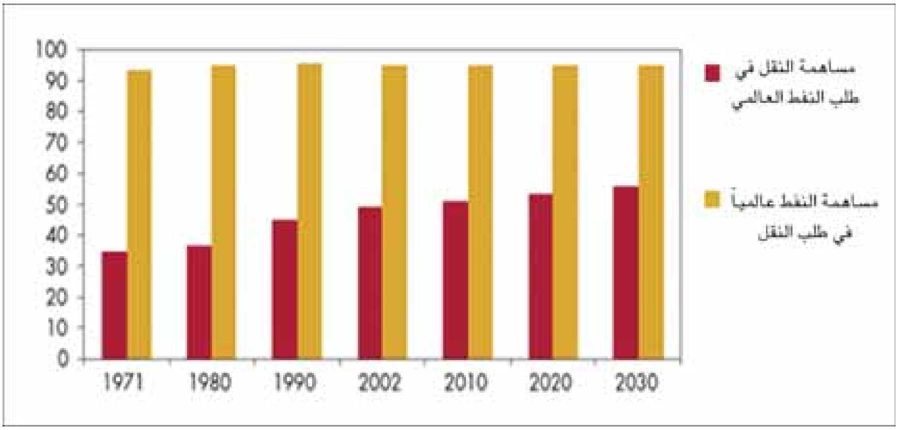
شهد القرن الماضي نمواً مطّرداً لدور النفط والغاز في تفعيل التطور حول العالم. وتخبرنا كل الدراسات حول مستقبل الطاقة بأن النفط والغاز سيبقيان مهيمنان في إمداد الطاقة عالمياً حتى في هذا القرن. وتتصور دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004 أنه من دون طاقة جديدة وسياسات بيئية ملائمة، سيستمر ازدياد الطلب على النفط بنسبة 1.6 في المئة لكل عام (الشكل 1 ـ 1).

ويتوقع أن يستمر النفط بتزويد أكثر من 90 في المئة من متطلبات الطاقة لمركبات النقل، في الأقل، حتى عام 2030 (الشكل 1 ـ 2). وستزداد الحاجة إلى الغاز الطبيعي بشكل أسرع بمعدل 2,3 في المئة لكل عام. ومادام الغاز يزوّدنا بطاقة أكثر نظافة من الوقود الأحفوري، فإنه يدعي حصة متنامية في سوق توليد الكهرباء. حتى في سيناريوهات مثل السيناريو البديل الذي نُشر في دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004 من أجل تبنّي سياسات صارمة لكبح انبعاث غاز الـ CO_2، يبقى الازدياد في استهلاك النفط والغاز مهماً.



الشكل (1 ـ 1): الطلب العالمي الأولي للطاقة على مرّ الوقت في سيناريو الـ IEA المرجعي

المصدر: WEO-2004, IEA.



الشكل (1 ـ 2): نسبة المساهمة المئوية للنقل في الطلب العالمي على النفط، نسبة المساهمة المئوية للنفط في نقل الطاقة المطلوبة

المصدر: WEO-2004, IEA.

الموارد والاحتياطي

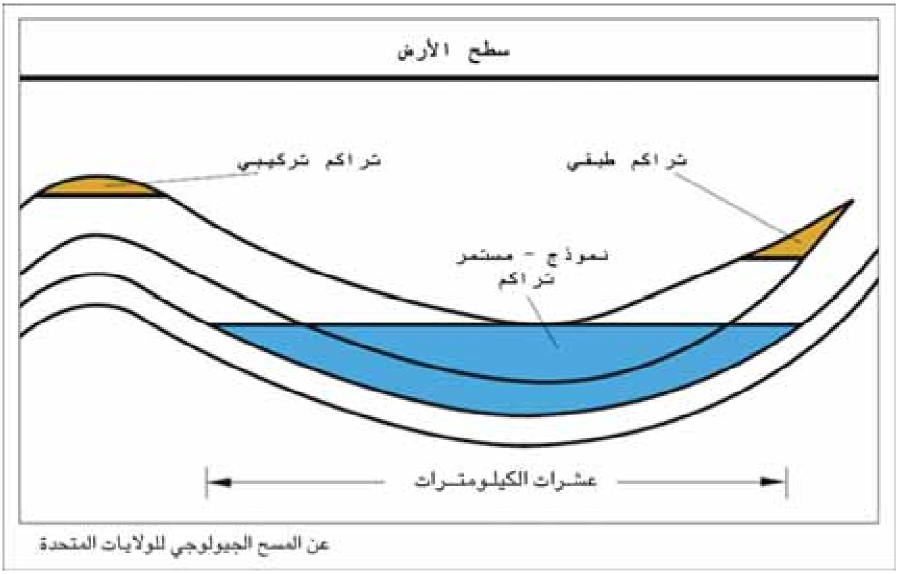
من أين يأتي النفط والغاز فعلياً؟ إنهما نتاج ترسبات تحت سطحية. يوجد النفط والغاز في المسامات الصغيرة لطبقات الصخور الرّسوبية (الشكل 1 ـ 3) المدفونة في القشرة الأرضية (الشكل 1 ـ 4).

بينما تختلف النظريات عن أصل هذه الفحوم الهيدروكربونية، يتجه الإجماع بشكل عام إلى أن معظم الرسوبيات تنشأ من دفن وتحوّل الكتل الحيوية خلال الأحقاب الجيولوجية، أي خلال الـ 200 مليون سنة الأخيرة. ومن حيث الكميات، فإن مجمل كمية النفط والغاز الموجودة تحت سطح الأرض محدودة بالتأكيد. وبما إن بعض هذه الموارد لم تكتشف، فهناك يوجد شك لا بأس به حول حجم الموارد غير المكتشفة. فإن معظم التقديرات المستخدمة لمجمل كميات الفحوم الهيدروكربونية التي يمكن أن توجد تحت سطح الأرض هي التقديرات المقدمة من هيئة المسح الجيولوجي الأميركية للعام 2000. وتتعامل هذه التقديرات بشكل أولي مع النفط والغاز التقليديين.

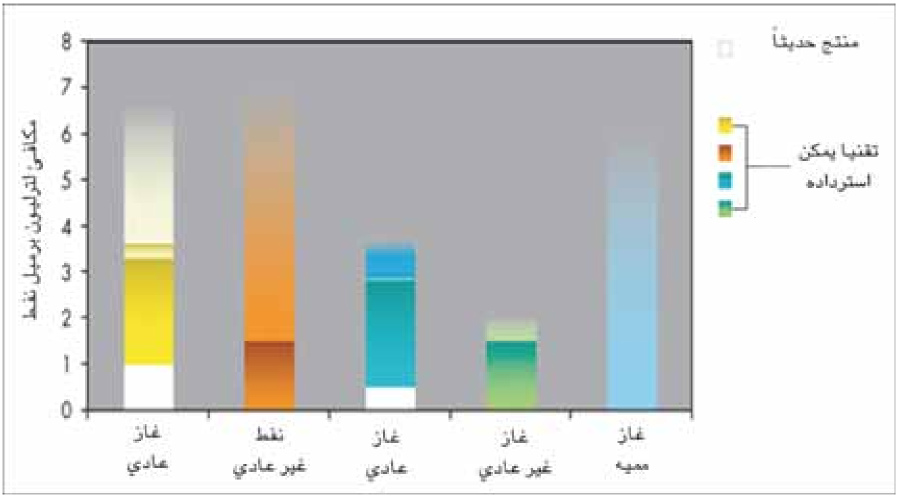
ويمكن العثور على معطيات لأنواع موارد أخرى في مصادر أخرى[1]. وتلخص الإحصائيات الآتية الاكتشافات المجمعة، التي تظهر في مخطط (الشكل 1 ـ 5). (الصندوق (1) يشرح المصطلحين تقليدي وغير تقليدي، ويمكن العثور على تفاصيل أكثر في الفصلين الثالث والرابع).

(1) H. H. Rogner, «An Assessment of World Hydrocarbon Resources,» *Annual Reviews of Energy and Environment*, vol. 22 (1997), pp. 217-262; World Energy Assessment, <http://www.undp.org/seed/eap/activities/wea/drafts-frame.html>; SAUNER (Sustainability and the Use of Non-Renewable Resources), *Summary Final Report*, ENV4-CT97-0692, November 2000, <http://www.bath.ac.uk/~hssam/sauner>; David L. Greene, Janet L. Hopson and Li Jia. *Running Out of and Into Oil: Analyzing Global Oil Depletion and Transition Through 2050*, ORNL/TM- 2003/259, <http://cta.ornl.gov/cta/Publications/pdf/ORNL_TM_2003_259.pdf>; Alexei V. Milkov, «Global Estimates of Hydrate-Bound Gas in Marine Sediments: How Much is Really out There?» *Earth-Science Reviews*: vol. 66, issues 3-4 (2004), pp. 183-197; IEA WEO (IEA (International Energy Agency): *World Energy Outlook: 2001 Insights* (Paris: OECD/IEA, 2001), and *World Energy Outlook* (2004).

الشكل (1 ـ 3): مثال عن لباب صخرية تحمل نفطاً



الشكل (1 ـ 4): طبقات رسوبية نموذجية تحمل نفطاً أو غازاً



الشكل (1 ـ 5): موارد الهيدروكربون في العالم

يمثّل الشريط الأصفر الفاتح الرفيع في عمود النفط التقليدي والشريط الأزرق الفاتح في عمود الغاز التقليدي مساهمة تقانات الاستخراج المستقبلي المكثف للنفط خارج تلك المفترضة في تحاليل هيئة المسح الجيولوجي الأميركية (انظر الصندوق 11 من أجل التفاصيل).

تستند إلى معطيات هيئة المسح الجيولوجي الأميركية والـ IEA.

■ النفط

● **ثمة 7 إلى 8 تريليونات برميل نفط تقليدي**، منها 3,3 تريليون برميل اعتبرت تقنياً أو (بشكل نهائي) قابلة للاستخراج، وأُنتج 1.0 تريليون(2).

● **سبعة تريليونات برميل من النفط غير التقليدي** (نفط ثقيل، بيتومين، رمال نفطية وطَفَل نفطي). تتراوح الكمية المقدرة تقنياً التي يمكن استخراجها من تريليون برميل إلى ثلاثة تريليونات برميل، وأُنتج تقريباً 0.01 تريليون برميل حتى اليوم.

■ الغاز

● **450 تريليون متر مكعب من الغاز الطبيعي التقليدي القابل للاستخراج تقنياً**، أو 2,8 تريليون مكافئ برميل نفطي، منها حوالى 80 تريليون متر مكعب

---

(2) تشمل تلك الأرقام سوائل الغاز الطبيعي (NGL)، الكمية الصغيرة من النفط الذي يتكثف عند إنتاج الغاز من عدة حقول. وتشمل أرقام الغاز «الغاز المرافق» الذي ينحل في احتياطيات النفط.

تم إنتاجها (0,5 تريليون مكافئ برميل نفطي). يوجد عدة تقويمات للغاز الطبيعي غير القابل للاستخراج تقنياً، لكن عوامل الاستخراج من أجل الغاز التقليدي تميل إلى أن لا تكون عالية، حوالى 70 في المئة فعلياً.

- **في الأقل 250 تريليون متر مكعب من الغاز غير التقليدي**، أو 1,5 تريليون مكافئ برميل نفطي (طبقة فحم الميثان، غاز غير مستخرج، طَفَل الغاز). وبالرغم من عدم وجود تقويم معتمد عالمياً يمكن أن يوجد ضعفا أو ثلاثة أضعاف ذلك. وقد أُنتج حوالى 0,01 تريليون مكافئ برميل نفطي من الغاز غير التقليدي.

- **ما بين 1000 و10000000 تريليون متر مكعب من الغاز محجوز في شكل هيدرات** في مستوى قاع البحر أو في مستويات متجمدة (بين 6 تريليونات و60000 تريليون مكافئ برميل نفطي). وتتفاوت التقويمات بشكل كبير. ولكن المتفق عليه بشكل عام أن الموارد هنا أكبر بكثير من موارد الغاز التقليدي. ووضع الاستخراج غير معروف.

الصندوق 1 «تقليدي» و«غير تقليدي»

لا يوجد اتفاق دولي على تعريف المقصود بالنفط والغاز التقليديين، على عكس الهيدروكربونات غير التقليدية. وتقريباً، يوصف أي مورد هيدروكربوني يتطلب إنتاجه تقانات مختلفة عن الاتجاه السائد في الاحتياطيات الحالية المستثمرة بغير التقليدي. ومع ذلك يبدو هذا التعريف غير محدد وتعريفاً يعتمد على الزمن. وفي الحقيقة، من الممكن أن يصبح النفط الثقيل غير التقليدي في المستقبل البعيد الأمر الاعتيادي بدلاً من كونه استثناء.

النفط

يستخدم بعض الخبراء تعريفاً يعتمد على كثافة النفط، أو ثقالته API (ثقالة معهد النفط الأميركي)، فمثلاً، يُعتبر كل النفط الذي له ثقالة أقل من 20 API (أي إن الكثافة أكبر من 0.934 g/cm^3) نفطاً غير تقليدي. ويشمل ذلك النفط الثقيل والبيتيومين، وترسبات القطران. وفيما يملك هذا

التصنيف دقة، غير أنه لا يعكس دوماً أياً من التقانات التي استخدمت في الإنتاج. مثلاً، بعض أنواع النفط ذات 20 ثقالة API التي وجدت في احتياطيات أعماق البحار في البرازيل استُخرجت باستخدام تقانات تقليدية كلياً. ويركز خبراء آخرون على لزوجة النفط، فيعتبرون أن النفط الذي يتدفق بدرجة حرارة وضغط احتياطي النفط دون الحاجة إلى تقانات تخفيض اللزوجة نفطاً تقليدياً. ولكن ربما يحتاج نفط كهذا إلى معالجة خاصة على السطح إذا كان لزجاً جداً حتى يمكنه التدفق على السطح حسب أحوال السطح.

يعتبر الطَفَل النفطي بشكل عام نفطاً غير تقليدي، ومع ذلك فهو لا ينسجم مع التعاريف السابقة. وهناك تفاصيل أكثر حول ذلك في الفصل الثالث. ويعتبر كذلك كل من النفط المشتق من معالجة الفحم بتقانات تسييل الفحم (CTL)، والنفط المشتق من الغاز من خلال تقانات تسييل الغاز (GTL)، غير تقليديين. وعادة ما تكون المواد الخام وقوداً أحفورياً مثالياً تقليدياً. وسوف يناقش هذا الموضوع باختصار في الفصلين الخامس والسابع.

هناك منهجية أخرى مستخدمة بشكل ملحوظ في هيئة المسح الجيولوجي الأميركية باعتبار النفط أو الغاز غير تقليدي طبقاً للوضع الجيولوجي للاحتياطي النفطي. وتكون الهيدروكربونات تقليدية إذا كان الاحتياطي النفطي فوق الماء أو ماء يحتوي رَسوبيّات وكان محدداً نسبياً. وأما إذا كان الحال غير ذلك، فإن الهيدروكربونات تكون غير تقليدية. هذا النوع من التعريف له أساس جيولوجي، غير أنه لا يتلازم دائماً مع التقانات المطلوبة للإنتاج التي تعتبر محط الاهتمام الرئيس لهذه الدراسة.

الغاز

إن التعاريف مبهمة هي الأخرى، كما هو الحال بالنسبة إلى النفط. وبشكل عام، تصنّف صناعة الغاز الموجود في أنواع غير مألوفة من الاحتياطيات غازاً غير تقليدي. والأنواع الرئيسة هي: طبقة فحم الميثان (CBM) التي تتكون من غاز ذو صلة بطبقات فحم مدفونة في الأعماق،

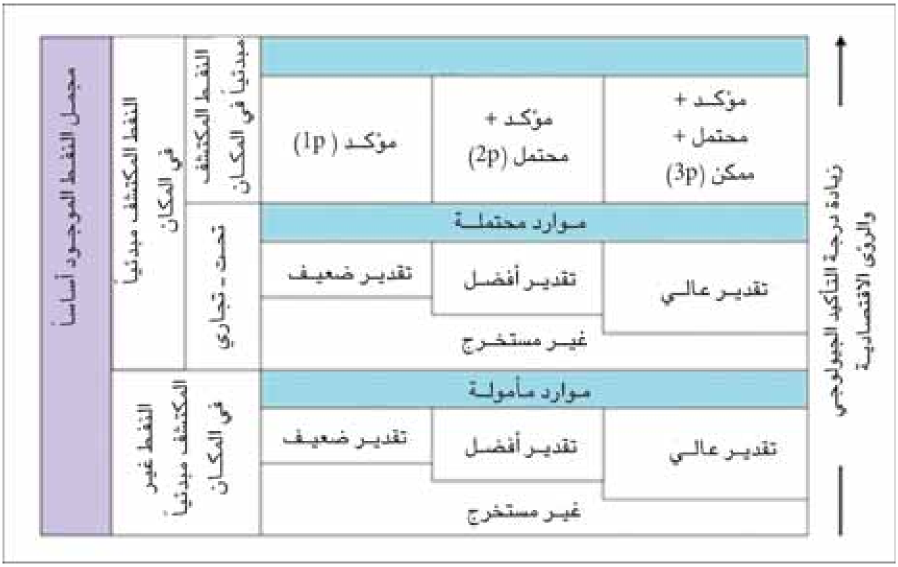
والغاز المحجوز: هو غاز من احتياطيات نفطية ذات قابلية نفاذ ضعيفة جداً يمكن استخراجه بمعدل اقتصادي باستخدام تقانات إنتاج خاصة (استخدام منهجي لتقانات التحفيز). وبما أن طبقة فحم الميثان لها تعريف واضح، فهناك سلسلة متصلة بين احتياطيات الغاز التقليدية والاحتياطيات الكتيمة، بدون أي تحوّل حاد. وتستخدم تقانات التحفيز كذلك بشكل مستمر من أجل الاحتياطيات التقليدية. وقد نوقشت هذه المسألة بشكل مفصل في الفصل الرابع.

يمكن للمرء كذلك إدراج كلٍّ من «الغاز الفقير» و«الغاز الفاسد»؛ وهو الغاز الموجود في الاحتياطيات التقليدية لكنه يحتوي على تركيز عالٍ من الشوائب (نيتروجين وغاز ثاني أكسيد الكربون في «الغاز الفقير»، غاز كبريت الهيدروجين في «الغاز الفاسد») مما يؤثر سلباً في الاقتصاد.

تشير هذه الأرقام إلى أن جزءاً صغيراً من موارد الهيدروكربون الموجودة قد أنتجت. ومع ذلك، فليس من الممكن استخراج كل هذه الموارد، إذ إن بعض الموارد غير قابلة للاستخراج باستخدام التقانات الحالية المعروفة. وهناك موارد أخرى، على الرغم من أنها قابلة للاستخراج تقنياً، إلا أن استخراجها غير اقتصادي وفق الأسعار الحالية أو المتوقعة. إن استخراجها ببساطة سيكون مكلفاً جداً باستخدام التقانات الحالية. ولذا فإن الاحتياطيات «المؤكدة» و«المحتملة» هي هيدروكربونات يمكن اعتبار أن استخراجها اقتصادي وفق الأسعار الحالية.

وعملياً فإن الكميات هنا يمكن تقديرها فقط إذ إن كمية النفط المحددة التي ستُنتج لا يمكن تحديدها قبل استخراجها وردم الاحتياطي النفطي. ولتقديم بعض التوحّد والتجانس في الأشكال المستخدمة من قبل مختلف الشركات، قامت منظمات عديدة بتنظيم طرائق التقويم (شكل 1 ـ 6). ومع ذلك تبقى هناك درجة من اللايقين، ولهذا لابدّ من الحصول على رأي آخر[3].

(3) من أجل النقاش الحالي، انظر مثلاً موقع: <http://www.otcnet.org/2005/presentation/index.html>.



الشكل (1 ـ 6): تصنيف موارد الهيدروكربونات

المصدر: SPE/WPC/AAPG (2000).

من الواضح أن تقديرات الاحتياطي المؤكد أو المحتمل هي ببساطة مجرد لقطات. ومع مرور الزمن ستتغير الصورة مع تطور الأسعار فيما تعمل التقانات الحديثة، وبشكل خاص، على تخفيض كلفة الإنتاج من بعض الموارد. ويمكن للتقانة حتى أن تفتح وسائل للوصول إلى هيدروكربونات غير مكتشفة سابقاً. وفي الحقيقة، فإن مستوى «الاحتياطي المتبقي» من النفط بقي ثابتاً تاريخياً على الرغم من أن الكميات المستخرجة في السنوات السابقة (الشكل 1 ـ 8). وإن إضافة الاحتياطي الجديد عوضت الاستهلاك تقريباً.

إن «أفضل التقديرات» الحالية للاحتياطي المؤكد للنفط وللغاز الطبيعي المسيّل معروضة في الشكل (1 ـ 7). ويمكن رؤية احتياطي النفط بعامل الزمن المؤكد في الشكل (1 ـ 8). وأما احتياطي الغاز المؤكد فإنه معروض في الشكل (1 ـ 9).

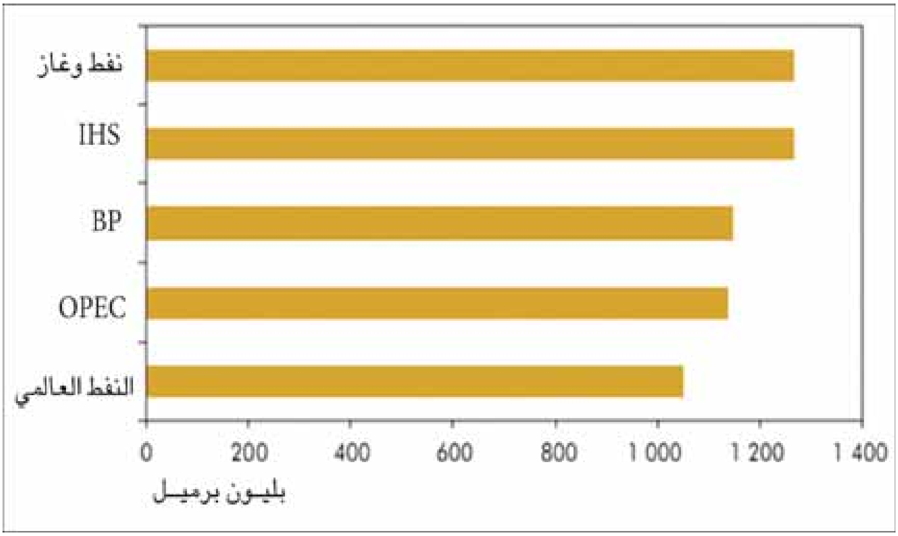
يجب فحص هذه الأرقام في ضوء أشكال النفط والغاز المنتجة حتى تاريخه ومعدلات الإنتاج السنوي (30 مليون برميل من النفط وثلاثة تريليونات

متر مكعب من الغاز في عام 2004). إن معدل الاحتياطي المؤكد بالنسبة إلى الإنتاج السنوي الحالي تعطي إحساسات تقريبية عن عدد السنوات المتبقية للإنتاج باعتبار أن الاحتياطي سيبقى كما هو اليوم. وهذا يعني السنوي 40 سنة تقريباً للنفط و60 سنة للغاز.

لقد أدى المستوى شبه الثابت للاحتياطي المتبقي ببعض المستثمرين إلى اعتبار أن مستويات كهذه ستستمر إلى ما لا نهاية، وأن التطور التقاني سوف يؤمن أي كميات مطلوبة من الهيدروكربونات. ويؤكد آخرون أن الهيدروكربونات منتهية بلا شك، وأن نصف الاحتياطي المؤكد من النفط التقليدي في الأرض قد تم استهلاكه. وبسبب اللايقين إزاء كميات الموارد والاحتياطي، فإنه من الصعب التنبؤ بزمن «ذروة النفط»[(4)]، أي متى يُتوقع أن يبدأ الإنتاج بالتراجع. وتتراوح التوقعات المقدرة من الآن وحتى عام 2050 أو أكثر. وفي الحقيقة، يتفق عدة خبراء بأن النفط التقليدي خارج منظمة أوبك شرق الأوسط قد وصل إلى الذروة، أو أنه سيصل إليها خلال العشر سنوات القادمة. ويرد بعض المتفائلين أنه حتى ما إذا كان الأمر كذلك، فإن الهيدروكربونات غير التقليدية متوفرة بكثرة، وأن التقانة ستجعل من الممكن استخراجها بكلفة مقبولة.

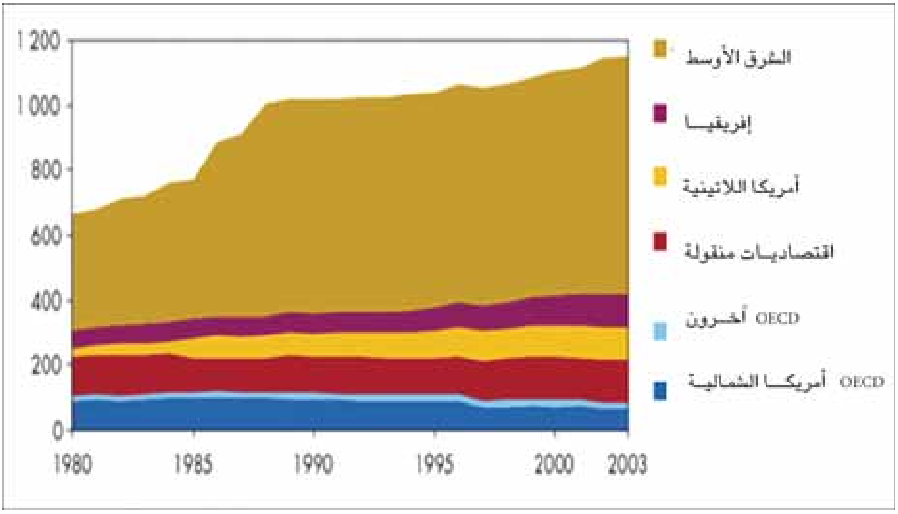
مع ذلك، فإن الأسئلة الرئيسة، ليست عن الوقت الذي ستكون فيه ذروة إنتاج النفط التقليدي، ولكن عن الكلفة المستلزمة (ويجب أن لا ننسى كلفة انبعاثات غاز الـ CO_2) في تصنيع هيدروكربونات غير تقليدية وجعلها متوفرة أو زيادة معدلات الاستخراج من الهيدروكربونات التقليدية. وستكون الأسئلة كذلك عن المكاسب الفعالة للطاقة. إن الأجوبة عن هذه الأسئلة هي التي ستحدد مدى البعد، ومتى ستحل الموارد الأولية الأخرى من الطاقة مثل الفحم، والذّرة، أوالطاقة المتجددة محل الهيدروكربونات في الدور الذي تؤديه الآن.

(4) المصطلح «ذروة النفط» يستخدم عموماً للإشارة إلى النقطة العليا في ذروة الإنتاج العالمي. لاحظ الصندوق 2 من أجل نقاش مختصر.



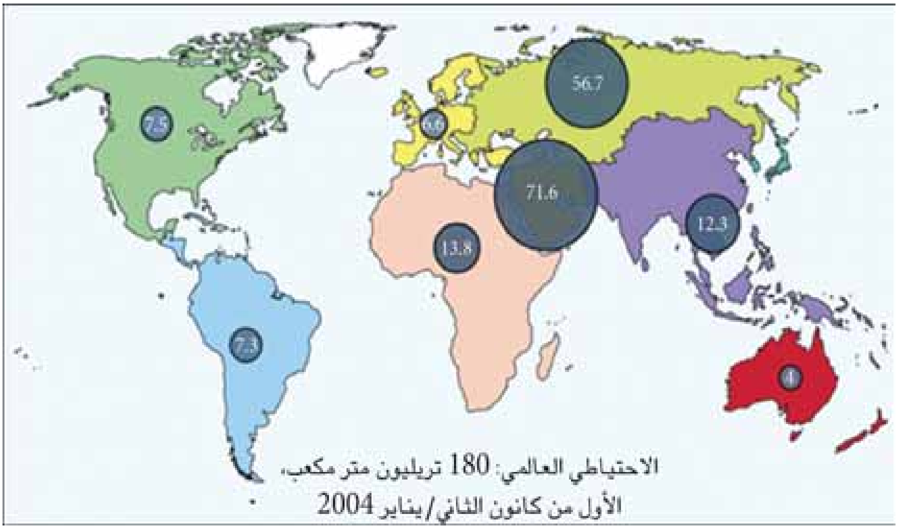
الشكل (1 ـ 7): النفط الخام والاحتياطي من الغاز الطبيعي المُسيّل (NGL) في نهاية عام 2003

المصدر: WEO-2004, IEA .



الشكل (1 ـ 8): تطور احتياطي النفط المؤكد بعامل الزمن

المصدر: WEO-2004, IEA .



الشكل (1 ـ 9): الاحتياطي المؤكد عالمياً من الغاز الطبيعي بتريليون الأمتار المكعبة

المصدر: WEO-2004, IEA.

التوزع الجغرافي

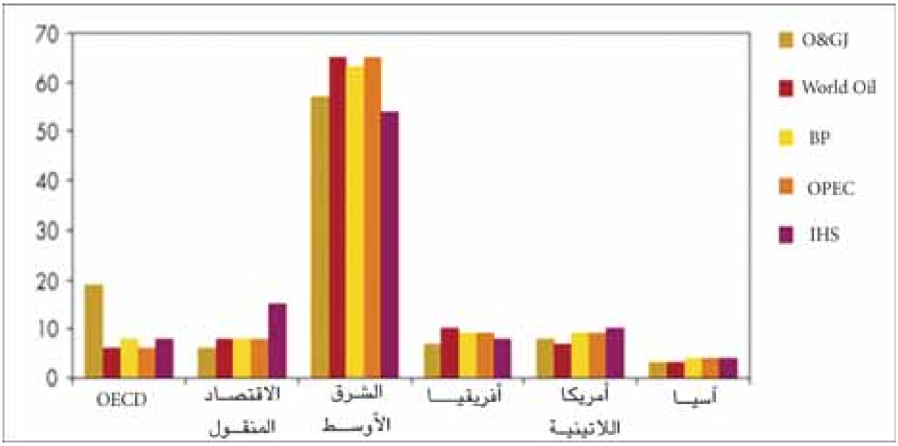
بالطبع لا تتوزع الهيدروكربونات بشكل متساوٍ حول العالم، إذ إن بعض المناطق والدول تحظى بكميات كبيرة وأخرى لا تملك شيئاً الشكل (1 ـ 10).

كما يصوّر الشكل (1 ـ 10) أن معظم الاحتياطي المؤكد من النفط التقليدي يوجد في منظمة بلدان OPEC شرق الأوسطية: إيران، والعراق، والكويت، والسعودية، والإمارات العربية المتحدة.

ويوجد الغاز التقليدي كذلك بشكل رئيس في روسيا ودول الاتحاد السوفياتي السابق، وإيران، وقطر، والسعودية، كما هو مصوّر في الشكل (1 ـ 9).

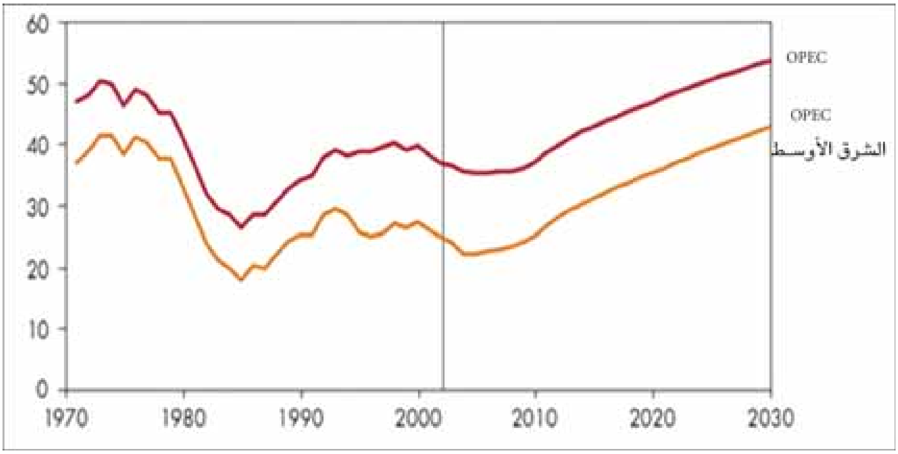
بما إن هذا الاحتياطي لا يوجد غالباً في نفس مناطق التسويق، فإن اعتبارات والسلامة وتنوع الإمداد من العوامل المهمة التي يجب أخذها في الحسبان أثناء اتخاذ القرارات باستخراج كميات أكبر من الهيدروكربونات من أماكن الترسبات في مناطق أخرى أكثر قرباً أو من خلال تطوير هيدروكربونات غير تقليدية. ووفقاً لهذا، فإن سيناريو دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004 يتوقع أن

43 في المئة من إمداد النفط العالمي سيأتي من دول أوبك شرق الأوسطية بحلول عام 2030، مقارنة بـ 25 في المئة عام 2004 (الشكل 1 ـ 11).



الشكل (1 ـ 10): توزع الاحتياطي المؤكد من النفط التقليدي، طبقاً لمصادر عديدة، بنسب مئوية

المصدر: WEO-2004, IEA.

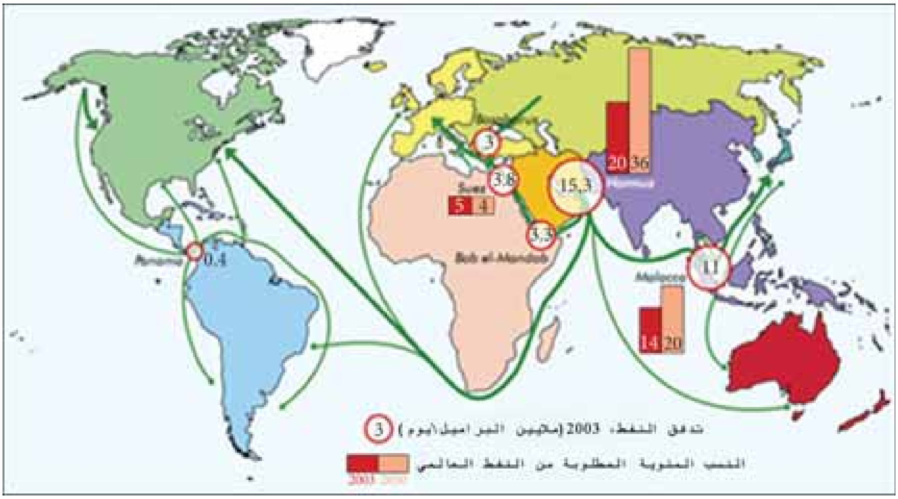


الشكل (1 ـ 11): منظمة الأوبك، ونسبة مساهماتها شرق الأوسطية في تزويد إمداد النفط العالمي

المصدر: WEO-2004, IEA.

نقل النفط والغاز

بسبب عدم تساوي التوزع الجغرافي، فقد تم الاتجار بالنفط ونقله إلى جميع أنحاء كل العالم. غير أن نقل الغاز بشكل اقتصادي كان أكثر صعوبة وكانت تجارة الغاز إقليمية تقليدياً أكثر من كونها عالمية. ومع ذلك، فإن تجارة الغاز العالمية، في الوقت الراهن، تتطور، ومن الممكن افتراض مقاييس شبيهة لتجارة النفط. وتشمل المحفزات على، **أولاً**، خفض الإنتاج في حقول الغاز التقليدي في الولايات المتحدة الأميركية وأوروبا. و**ثانياً**، تعزيز القدرة التقانية لمد خطوط أنابيب أطول، ونقل الغاز بحراً لمسافات بعيدة على شكل غاز طبيعي مسيّل. ويتركز الاهتمام هنا على الاستيعاب المستقبلي لقنوات الملاحة البحرية المزدحمة في الوقت الراهن (الشكل 1 ـ 12). وقد خصص الفصل الخامس لنقل النفط والغاز.



الشكل (1 ــ 12): تدفق النفط ونقاط الاختناق الرئيسة لعام 2003

المصدر: WEO-2004, IEA.

بنية صناعة النفط والغاز

إن كثيراً من الفاعلين متورطون في سلسلة إنتاج النفط والغاز بدءاً من أصحاب الموارد تحت السطحية إلى المنظمات المموّلة، وإلى المشغّلين، والحفّارين، ومصنعي التجهيزات، والمقاولين، ومقدمي الخدمات، والشركات الهندسية.

تصنف الشركات المنتجة بشكل عام إلى ثلاث مجموعات رئيسة.

- **الشركات الكبرى الدولية**: مثل شركة إيكسون موبيل (exxon mobil) وشل (shell) وشركة بريتش بيتروليوم (BP) وتوتال (total). . . إلخ.

نموذجياً، تملك هذه الشركات زمام المشاريع الكبرى في كل أنحاء العالم، ومهارات تقنية، ولها قدرة الوصول إلى رأس المال. وتقوم كذلك بالمجازفة في الاستثمارات المهمة سواء ما يتعلق بالسوق، أو التقانات أو ذات الطبيعية السياسية. وتسعى هذه الشركات كذلك من أجل الأرباح ذات الصلة. وتدعم هذه الشركات الكبرى تطور التقانة بشكل كبير جداً.

- **الشركات المستقلة**: هي شركات خاصة ذات حجم أصغر مختصة بمشاريع صغيرة تركز على مناطق جغرافية محددة أو على أنواع من الاحتياطيات النفطية. وتعمل بالاعتماد على قاعدة كلفة صغيرة. وغالباً ما تكون هذه الشركات ماهرة في إدارة الاحتياطيات القديمة أو التفاعل بسرعة مع تأرجحات أسعار النفط والغاز، وتتبنّى مشاريع توفر لها عائدات مالية سريعة. وهذه الشركات تكون عادة مبدعة في تطوير أنواع جديدة من الموارد، وفي تمكين فعالية معرفتها المحلية.

- **مالكي الموارد الكبرى**: هي شركات وطنية مالكة وتدير عادة حقول النفط في أراضيها. ومن الأمثلة العديدة شركة أرامكو ـ السعودية، وشركة PDVSA (فنزويلا) وشركة PEMEX (المكسيك). ويميل مالكو الموارد الكبرى إلى إدارة طويلة الأمد للموارد (على نقيض أسلوب القيمة الصافية حالياً ومعدلات التخفيض المهمة التي تشاهد لدى الشركات الخاصة). وبشيء من الاستثناء المهم، يميل مالكو الموارد الكبرى أن يكونوا تابعي تقانات جديدة أكثر من كونهم مطوّرين لها. وتنتج هذه الشركات سوية حوالى 70 في المئة من الاستهلاك العالمي للنفط والغاز. وتسيطر هذه الشركات على أكثر من 90 في المئة من الاحتياطي العالمي المؤكد.

بالطبع تتعايش كل الشركات ضمن هذا المفهوم، إذ إن بعض الشركات الوطنية تكون نشيطة دولياً. مثلاً بعض الشركات المستقلة تتنافس مع الشركات الكبرى من أجل المشاريع نفسها. وهناك توجّه قوي ضمن الشركات الوطنية من أجل المساهمة في مشاريع خارج بلادها، سواء من أجل تنوع مخاطر الاستثمار، كما هو الحال لدى شركة ستات أويل (statoil) النرويجية أو شركة

بتروناس(petronas) الماليزية، أو أنها تهدف إلى تزويد السلامة، كما هو الحال في شركات دول الاستيراد الخالصة مثل شركة CNPC وشركة سينيوبيك (sinopec) أو ONGC الصينية، وشركة النفط الهندية الوطنية. إن هذه الشركات الأخيرة تعطي أمثلة أولية عن شركات لها حضور دولي متنام وجهوزية لتبنّي مشاريع أكثر خطورة أو أقل جاذبية اقتصادياً لأن سياسة الشركات تقاد بواسطة سلامة الإمداد أكثر من اقتصاديات في أسس المشاريع كلٍّ على حدة.

في الفصول اللاحقة من هذه الدراسة سندرس ديناميكية تطوير الموارد الجديدة. ويكمن المفتاح من أجل هذه الديناميكية في استيعاب الكمية الضخمة الأولية لرأس المال المطلوبة لتطوير حقل ما: مسوح التنقيب عن، حفر وبناء الآبار، منشآت الإنتاج والمعالجة، النقل (أنابيب، ناقلات نفط، مصانع LNG). ويمثل انخفاض القوة الشرائية لرأس المال جزءاً كبيراً من كلفة إنتاج الهيدروكربون. وفيما تختلف هذه كثيراً حول العالم، فمن المحتمل أن 60 في المئة هي قيمة نموذجية. ومن جهة أخرى، فإن هامش كلفة الإنتاج، تكون منخفضة نسبياً، وتتراوح من أقل من دولار واحد لكل برميل في السعودية إلى أكثر من 10 دولارات لكل برميل في المناطق الصعبة الموجودة قبالة الساحل ومناطق القطب الشمالي. وعادة ما يتدفق عائد رأس المال الكبير المستثمر بعد عشر سنوات أو أكثر. ولهذا السبب تخطط عدة شركات كبرى مشاريعها على أساس أن سعر النفط هو حوالى 20 دولاراً أميركياً، حتى لو كان السعر الحالي أعلى من ذلك بكثير.

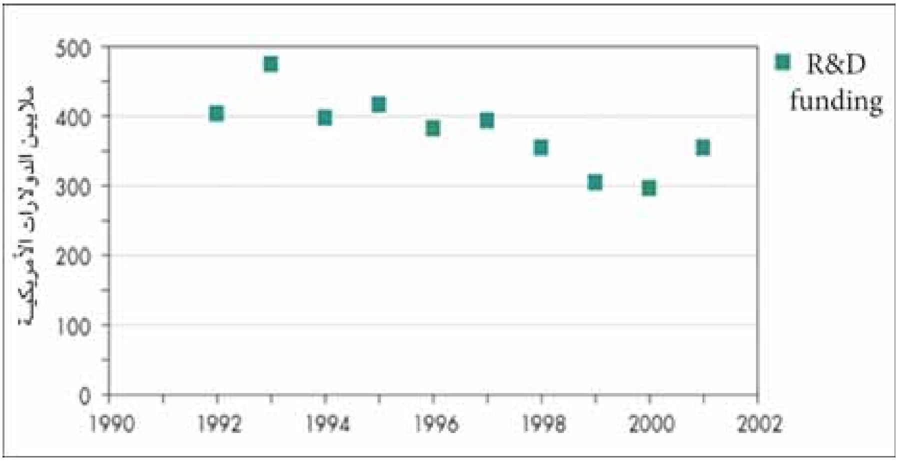
تتصرف الشركات المنتجة كمخططين ومصممين ومديري معظم مشاريع التنقيب والإنتاج. وتعتمد بشكل كبير على شركات الإمداد والخدمة من مقاولي حفر يملكون ويشغّلون منصات الحفر للقيام بالتنفيذ الفعلي. وتصمم الشركات الهندسية وتبني منشآت الإنتاج. وتُجري شركات الخدمة المسوح الزلزالية ومعظم العمليات المطلوبة في الآبار. وهكذا يؤدي قطاع الخدمة والتزويد دوراً مهماً في تطوير التقانة إلى جانب شركات الإنتاج نفسها.

البحث والتطوير (R&D)

يعمل مزوّدو الخدمة ومصنّعو الأجهزة، في دورهم كمطورين أوائل للتقانة الجديدة، عن كثب مع شركات النفط والغاز الكبرى. وتكون مجموعات النفط والغاز الدولية الرائدة أكثر نشاطاً في الأخذ بمفاهيم الإبداع، غير أن بعض

شركات النفط الوطنية فاعلين رئيسين أيضاً، كما هو واضح من نشاطات تقانة نفط المياه العميقة لدى شركة بتروبراس (petrobras) البرازيلية. وتضمن شركات الخدمة الرئيسة ومصنعي التجهيزات توفّر التقانة لكلّ الزبائن حول أنحاء العالم. وتساهم الشركات المحلية الأصغر كذلك بشكل فعّال في استمرار تطوير التقانة عن طريق رفع مستوى معرفتها المحلية لتجريب أفكار أكثر خطورة تكون غالباً بالشراكة مع شركات محلية مستقلة.

بينما يمكن الاستشهاد ببعض أرقام مموّلي الصناعة والبحث والتطوير الوطني، فمن الصعب الحصول على إحصاءات كامل الإنفاق على البحث والتطوير في ما يتعلق بتقانات أعلى سلسلة إنتاج النفط والغاز (IFB 2005). ومن الممكن أن يتراوح الرقم بين خمسة بلايين وعشرة بلايين دولار أميركي في العام. ويمثل هذا أقل من واحد في المئة من مجموع المبيعات الصناعية.



الشكل (1 ـ 13): الإنفاق في أعلى سلسلة الإنتاج على البحث وتطوير النفط والغاز

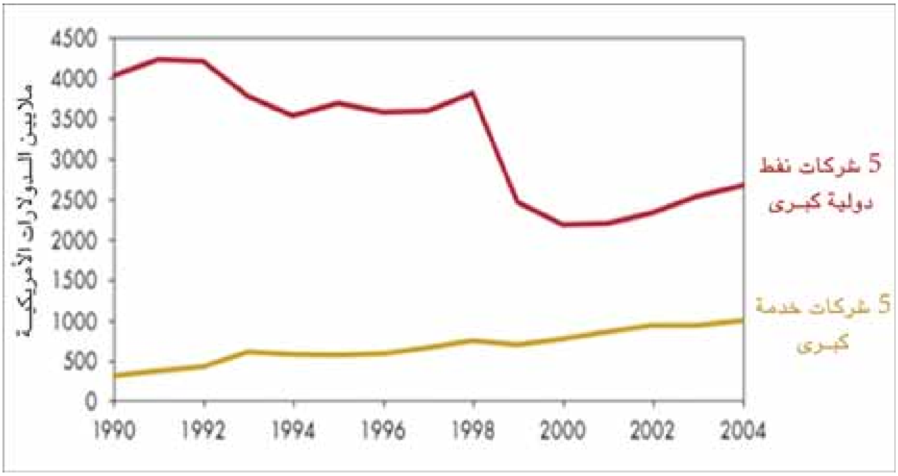
من قاعدة معلومات IEA، مستخدمين أشكال التقارير المقدمة من دول IEA واستكمالها من IEA.

إن الإنفاق العام على البحث والتطوير كما أفادت الدول الأعضاء في الـ IEA موضح في الشكل (1 ـ 13).

تراجع الإنفاق على البحث وتطوير النفط والغاز في أعلى سلسلة الإنتاج من مستوىً عالٍ بعد صدمات النفط في السبعينيات، واستمر هذا التراجع خلال

فترة انخفاض نسبي للأسعار في التسعينيات. وهناك عدد قليل من الدول تعتمد على مجمل هذا التمويل، وهي أستراليا، وكندا، وفرنسا، واليابان، والنرويج، والولايات المتحدة. ويرى بعض أن إنفاقاً كهذا مهم في من أجل دعم إنتاجهم الوطني من النفط والغاز. وتُعتبر فرنسا واليابان وحدهما الدولتان غير المنتجتين اللتين تستثمران بشكل كبير في البحث وتطوير النفط والغاز.

من الممكن تتبع الاستثمارات الكبيرة على البحث والتطوير لدى الشركات الكبرى المصنفة من خلال تقاريرها السنوية. ويوضح الشكل 1 ـ 14 اتجاهات وحجم الإنفاق لمجموعة شركات إنتاج وخدمات رئيسة. وقد خفّضت كذلك شركات النفط الكبرى استثماراتها خلال التسعينيات لتأقلمها مع أسعار النفط المنخفضة بالتوجه إلى نشاطات مزودين آخرين بالتركيز على الأعمال الأساسية ودمجها.



الشكل (1 ـ 14): إنفاق الشركات الكبرى على البحث والتطوير

من مصادر عامة ممنوحة من قبل: (Schlumberger, 1992).

وغالباً ما أعيد تركيز جهود هذه الشركات في البحث والتطوير على عدد محدد من المناطق يُعتقد أنها تقدم احتمالية أفضلية تنافسية، مثلاً في التنقيب في بعض أنواع الاحتياطيات المحددة. من ناحيتها، حافظت شركات الخدمة عملياً على مستويات أساسية متنامية في الاستثمار في البحث والتطوير. وتظهر مقارنة بين الشكلين 1 ـ 13 و1 ـ 14 بوضوح أن الإنفاق على البحث والتطوير

فاق كثيراً الإنفاق العام لدى الشركات الخاصة، كما يمكن أن يُتوقع ضمن صناعة ناضجة.

من الصعب قياس مساهمات البحث والتطوير للشركات المتوسطة والصغيرة، ففي أوروبا يجمع منتدى إبداع النفط والغاز الأوروبي (EUROGIF) أكثر من 2500 شركة إمداد وخدمة في صناعة النفط والغاز. وتقدم هذه الشركات أكثر من 250000 فرصة عمل ودخل سنوي يفوق 50 مليارَ دولارٍ أميركي. ويبلغ حجم إنفاقها على البحث والتطوير ملياري دولار أميركي كل عام تقريباً (Marquette, 2004). ومن الممكن أن يكون التخمين المناسب أن حوالى 25 في المئة يأتي من الشركات المتوسطة والصغيرة.

وبما إن المعلومات العامة عن الاستثمارات ضمن شركات النفط الوطنية قليلة، فإن القرائن السردية تفيد أن هذه الاستثمارات بدأت بالازدياد. فقد أنشأت، مثلاً، شركة أرامكو السعودية، وشركة بتروبراس، وشركة بتروناس مراكز للبحث والتطوير. ومع ذلك، عموماً، فمن المرجح أن 90 في المئة من البحث والتطوير في أعلى سلسلة إنتاج النفط والغاز تقوم به دول الـ IEA.

وحتى لو عُوّض ذلك بزيادة الاستثمار في البحث والتطوير في قطاع الخدمة والإمداد، فيمكن أن يكون انخفاض الاستثمار في البحث والتطوير ضمن شركات النفط الكبرى والحكومات إشارة مثيرة للقلق بأن التقدم التقاني قد يكون أبطأ في السنوات القادمة أكثر من الماضي.

دور التقانة

قبل استكشاف تأثير التقانة المستقبلي في صناعة النفط والغاز، من المناسب أن نلقي نظرة ارتجاعية على للتطورات حتى اليوم. وقد كانت الطرائق المعتمدة منذ حوالى 150 سنة في أعلى سلسلة إنتاج النفط والغاز شبيهة بطرائق صناعة استخراج المعادن التقليدية أو البناء. ولكن التقانة المتقدمة باستمرار دفعت الصناعة باتجاه تقانات تشبه مهمات اكتشاف الفضاء الخارجي حالياً.

كان التنقيب فيما مضى أمراً عشوائياً توجهه الطبوغرافيا السطحية، وأما الآن فقد أصبح عملية موجهة من خلال عمليات حاسوبية مكثفة، فتجري الآن نمذجة الآثار وتطور الرَسوبيّات خلال تاريخ القشرة الأرضية («نمذجة الأحواض») من أجل حساب مرحلة النضج وحركة احتياطيات الهيدروكربون.

ويجري إعداد خرائط للمناطق الواعدة من خلال الأقمار الصناعية والمسح الجوي. وتُعدّ الصور الدقيقة للرَسوبيّات حتى عمق 5000 م تحت السطح من خلال المسوح الزلزالية التي تعطي بيانات تبلغ بحدود عشرة جيغا بايت لكل كيلومتر مربع.

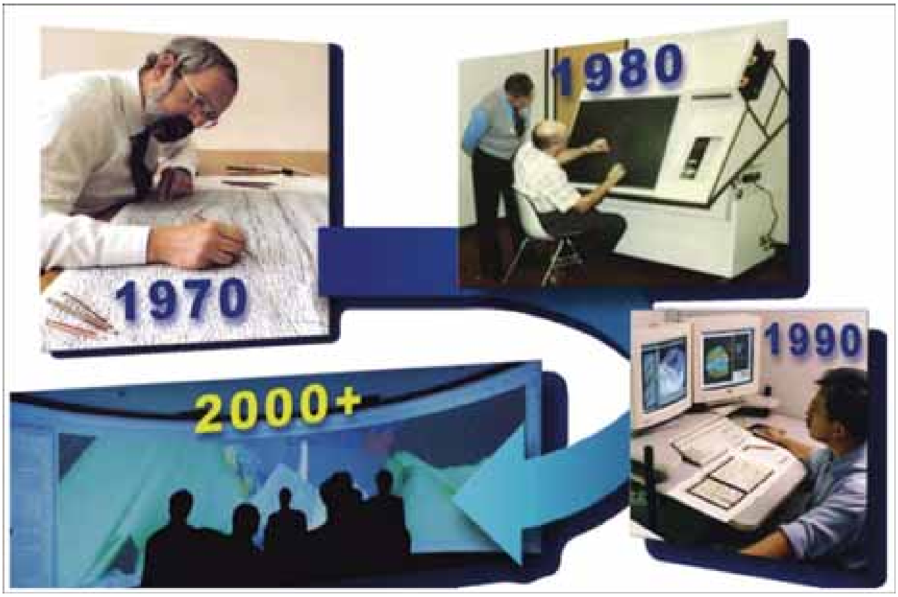
الشكل (1 ـ 15): من كوخ خشبي . . .

تقدمة: Pennsylvania Historical and Museum Commission, Drake Well Museum, Titusville, PA, United States: <http://www.drakewell.org>.

كان الحفر يجري بالمجرفة وبرفش ودلو معلق بنهاية حبل. أما الآن فإن الحفر يجري بحفارات دوّارة متطورة. ويقوم رأس حفارة مطلي بقليل من مسحوق الماس بحفر حفرة قطرها عشرين سمنتيمتراً خلال الصخور على عمق آلاف الأمتار تحت منصة الحفر. ومن الممكن التحكم بالمسار وتمكينها من الانحراف من حفر عمودي إلى حفر أفقي حتى عشرة كيلومترات، وأن تدور، وتلف، أو أن تحفر إلى الأعلى. وتجري كل هذه النشاطات تحت السطحية بعيداً عن الموقع الفيزيائي للمشغّل من خلال أجهزة تحكّم عن بعد لا تختلف كثيراً عن الأجهزة المستخدمة في بعثة المريخ.

الشكل (1 ـ 16): . . . إلى منصة الحفر والإنتاج في بحر الشمال

تقدمة: شركة شل.



الشكل (1 ـ 17): من الورق إلى الغوص ثلاثي الأبعاد

تقدمة: شركة شل.

يشمل الحفر البحري قبالة الساحل، الذي بدأ مع نصب المنصات على قاع البحر على عمق عدة أمتار، الآن سفناً كبيرة تتموضع بشكل ديناميكي بحيث تكون قادرة على ضبط مواقعها في الأعماق البحرية بدقة حتى أجزاء من الأمتار. كما إن المنشآت الحالية الضخمة العائمة تحمل منظومة واسعة من المنشآت تقف فوق عمق 3000 متر.

لقد كانت إدارة الاحتياطي النفطي مسألة ضبط الصمّام للسيطرة على التدفق الطبيعي للهيدروكربونات. أما الآن، فإنها تستلزم حلقة مغلقة من المحاكاة الكمبيوترية المتطورة («محاكي الاحتياطي النفطي») تدفع مواقع الآبار الجديدة، وحقن الماء، أو الغاز أو سوائل معقدة أكثر لزيادة كمية الإنتاج من الهيدروكربونات إلى أقصى حد. ويجري استكمال تطوير الحقل باستخدام كميات كبيرة من المعلومات من قياسات أُخذت داخل الآبار أو على مستوى السطح تُرى بالأبعاد الثلاثة في غرف «الواقع الافتراضي».

الشكل (1 ـ 18): . . . من الأنبوب الخشبي

الصورة تقدمة: S. T. Peas, Meadville, PA, USA, with thanks to Syracuse University and Onondaga Historical Society, Syracuse, NY, USA.

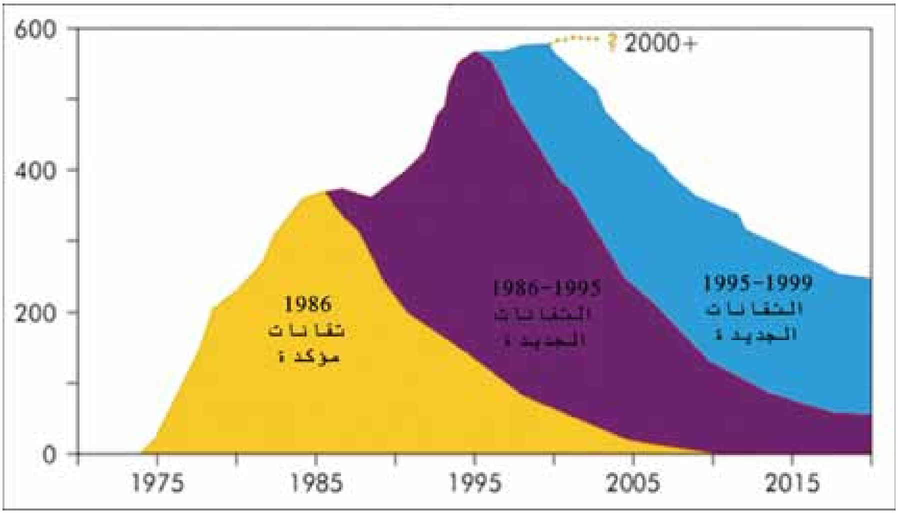
الشكل (1 ـ 19): . . . إلى حاملات الغاز الطبيعي المسيّل

تقدمة: شركة Statoil.

يقوم التقدم التقاني النظامي بتمديد الحدود لقابلية العمل في أعماق سحيقة في ظل أقصى ضغط للاحتياطي النفطي، أو في درجات حرارة أو أوضاع جغرافية صعبة.

وأكثر من ذلك تمكّن خطوط أنابيب نقل النفط المعقدة، مثل ناقلات النفط وناقلات الغاز الطبيعي المسيّل الآن وصول الهيدروكربونات إلى كل أنحاء العالم.

لقد مكّنت هذه القفزات المنتظمة في التقانة الهيدروكربونات من تزويد اقتصاديات العالم بالوقود لأكثر من مئة سنة. وفي أثناء هذه الفترة توقع المتخصصون، باستمرار، بنهاية عصر النفط. ويمكننا برهنة خطأهم من خلال التقدم التقاني فقط. ويمكننا أن نختم هذا الفصل بإيضاح أثر التقانة في حجم النفط المستخرج من بحر الشمال في عام 2000 (الشكل 1 ـ 20). وتؤدي التقانة دوراً رئيساً في تمديد حياة إقليم النفط هذا. وسوف نتفحص أمثلة أكثر في الفصول القادمة.



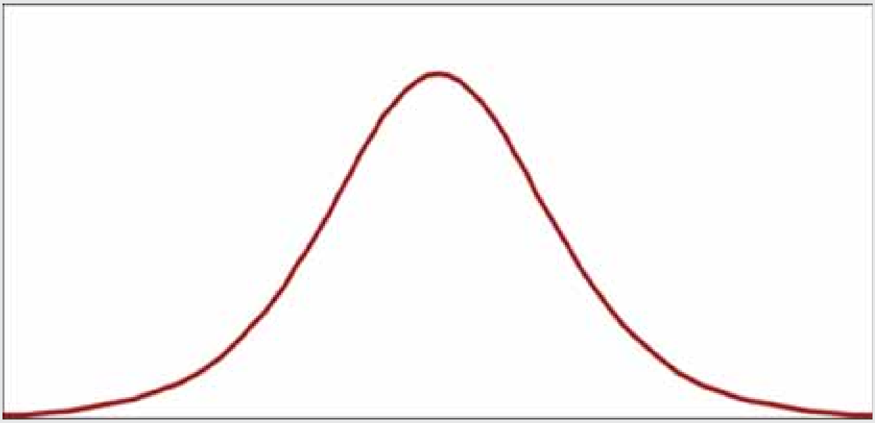
الشكل (1 ـ 20): تأثير تطبيق التقانة في الإنتاج من بحر الشمال، آلاف البراميل في اليوم

المصدر: الشبكة الأوروبية من أجل البحث في الطاقة ـ الجولوجيا (ENeRG) من قبل شركة شل.

الصندوق 2 ذروة النفط

ولّدت مسألة «ذروة النفط»، أي الزمن الذي يبدأ فيه إنتاج النفط العالمي بالتراجع، عدداً كبيراً من الأدبيات والجدل. إن الهدف من هذا الصندوق هو إعطاء مقدمة أولية لهذه المسألة. فقد نشأت فكرة ذروة نفط في عمل السيد م. ك. هوبرت (M. K. Hubbert)، الجيولوجي في شركة شل وهيئة المسح الجيولوجي الأميركية، الذي توقع بنجاح بذروة إنتاج النفط في الولايات المتحدة الأميركية. وتوجد طرائق مختلفة «لاشتقاق» منحني هوبرت. وقد استخدمنا هنا طريقة تركز على آلية التنقيب.

في المرحلة الأولى من التنقيب عن مورد مثل النفط، فإن معدل النجاح في الاكتشاف يكون ضئيلاً لأن الجيولوجيين لا يعرفون أي المواقع هي الأفضل للتنقيب. غير أنه فيما اكتُشف المزيد من النفط، تعلمنا أكثر عن أماكن وجوده، وازدادت معدلات النجاح. ومع ذلك، فلأن كمية النفط محدودة في الأرض، فسيأتي عملياً وقت يصبح فيه معظم النفط مكتشفاً، وسيجعل هذا الأمر اكتشاف احتياطيات إضافية أمراً صعباً، أي إن معدل نجاح اكتشافات جديدة سيقلّ. واعتماداً على هذه المناقشة، فمن المتوقع أن كمية النفط لو اكتُشفت بدلالة الزمن فستظهر كالمنحني المعروض في الشكل (1 ـ 21).



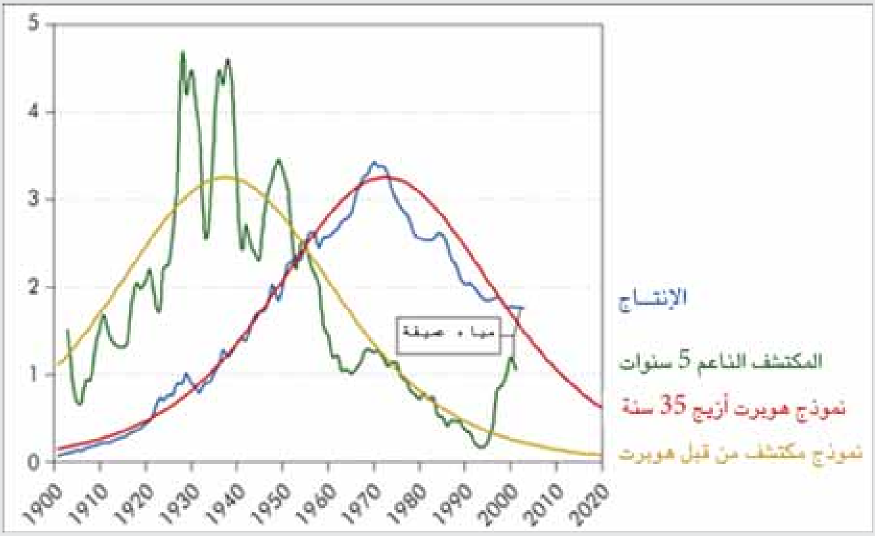
الشكل (1 ـ 21) : الشكل النظري لكمية النفط المكتشف بدلالة الزمن

أصبح من المتعارف، بعد هوبرت، وصف هذا المنحني بدالة منطقية:

$$Q(t) = \frac{Qutb\ \exp(-b(t-t_0))}{(1+\exp(-b(t-t_0))^2}$$

حيث إن Q(t) تشير إلى كمية النفط المكتشف في السنة t وQ_{tot} تمثل مجمل كمية النفط في الأرض، وb بارمتر، وt_o يمثل زمن ذروة النفط.

لا يوجد شيء دقيق في هذا الشكل الرياضي، وهو عبارة عن تمثيل بسيط مع الشكل الصحيح. إن الذي اكتشفه هوبرت هو أن تلك المعادلة الرياضية تمثل بشكل جيد المعطيات الفعلية من أجل الاكتشافات والإنتاج في الولايات المتحدة الأميركية الشكل (1 ـ 22).



الشكل (1 ـ 22): اكتشافات النفط السنوية وإنتاجه للولايات المتحدة بنهاية 48

المصدر: أعيد إنتاجها بإذن من (Laherrere, 2003).

إن حقيقة إمكانية وصف بيانات الإنتاج بمنحنى شبيه بمنحني بيانات الاكتشاف قد انتقلت ببساطة بتأخر زمني (35 سنة كما في الشكل 1 ـ 22) هو أمر مميز. ويمكن توقع حدوثه في أسواق العمل بشكل نموذجي في كل

الحقول الموضوعة بانتظام في الإنتاج الكامل بعد عملية الاكتشاف. إن النجاح المدهش لهوبرت في تنبؤه بالذروة في الإنتاج الأميركي يفيد بأن شروطاً كهذه كانت قد واجهتها الولايات المتحدة بنسبة أكبر أو أصغر خلال تلك الفترة الزمنية.

تدور الاختلافات حول ذروة النفط في الأدبيات حول أربع نقاط رئيسة:

ـ هل ينطبق نموذج هوبرت على إنتاج النفط عالمياً؟

ـ في حال يمكن تطبيق نموذج هوبرت، متى ستكون الذروة في إنتاج النفط عالمياً؟

ـ ماذا سيحدث بعد الذروة؟ كم ستكون سرعة انخفاض الإنتاج؟

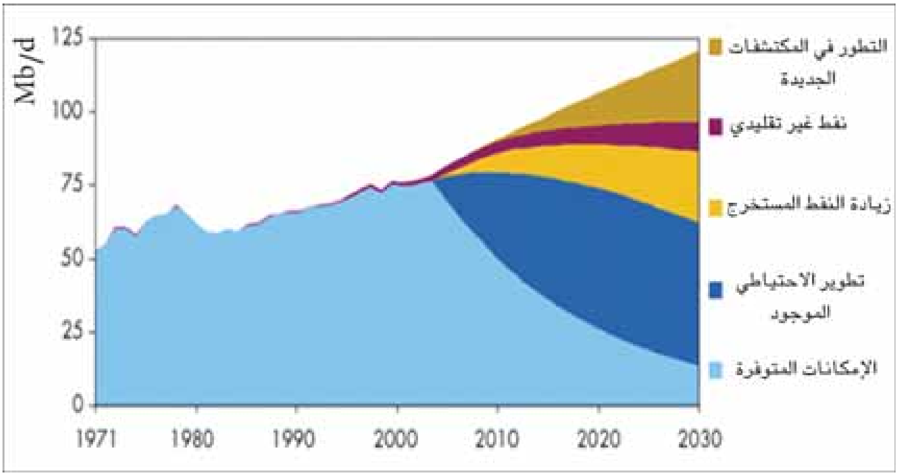
ـ ما هو الدور الذي ستمارسه التقانة في نماذج كهذه؟ تستطيع التقانة تغيير كمية النفط القابل للاستخراج (Q_{tot}) بدلالة زمنية، وتستطيع أن تؤثر في معدل التراجع بعد الذروة. إن هذا موضح كمثال في الشكل (1 ـ 20) لبحر الشمال. ويفضل بعض المحللين، في الحقيقة، استخدام «منحنيات هوبرت متعددة الدورات»، أي تراكب مختلف منحنيات هوبرت لدورات تقانية مختلفة لتلتقط التأثيرات التقانية المتقدمة.

مناقشة هذه الأمور تكون خارج نطاق هذا الكتاب. إن بعض الإشارات إلى الأدبيات المتعلقة بها يمكن الاطلاع عليها على موقع ASPO (http://www.peakoil.net) أو في الطبعات الحديثة لـ **مجلة النفط والغاز** (6 حزيران/يونيو 2005 و13 حزيران/يونيو 2005)

الفصل الثاني

النفط والغاز التقليديان

أظهرت تقديرات دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** عام 2004 أن النفط والغاز التقليديين سوف يستمران في السيطرة على الإمدادات خلال العقود الثلاث حتى عام 2030، حتى ولو أنه من المرجح أن تزداد الموارد غير التقليدية بشكل ملحوظ، الشكل (2 ـ 1). ولهذا السبب فإن جزءاً كبيراً من هذه الدراسة خُصّص للموارد التقليدية.

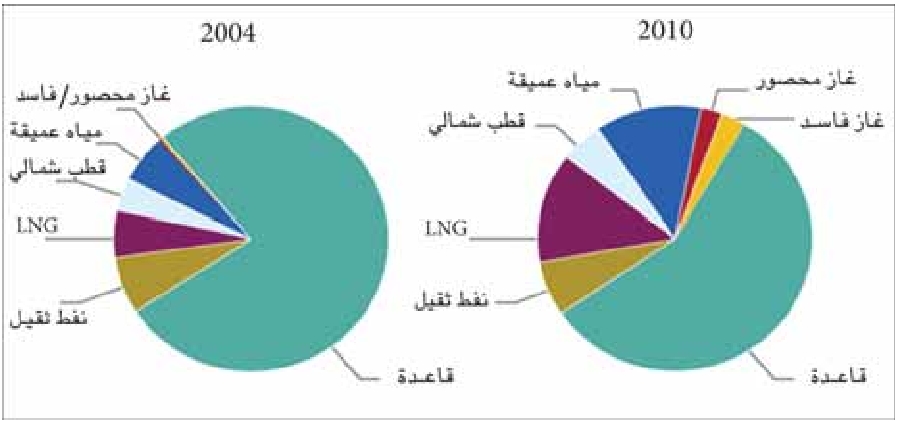


الشكل (2 ـ 1): إنتاج النفط العالمي بحسب المورد مقدّراً بمليون برميل في اليوم

المصدر: WEO-2004, IEA.

ويعكس منظور مشابه في عروضات إحدى الشركات في هذا المجال وهي

إيكسون موبيل، يظهر كيف أنه من المتوقع أن يتنقل الإنتاج بين أنواع مختلفة من الموارد في عام 2010 (الشكل 2 ـ 2). وتعمل شركات النفط الكبرى على مسارات متطورة متشابهة. إن الدور الرئيس المستمر للموارد التقليدية واضح، وكذلك الأمر بالنسبة إلى الانتقال إلى مناطق أكثر تحدٍّ (المياه العميقة، القطب الشمالي) وإلى الدور المتنامي للغاز.

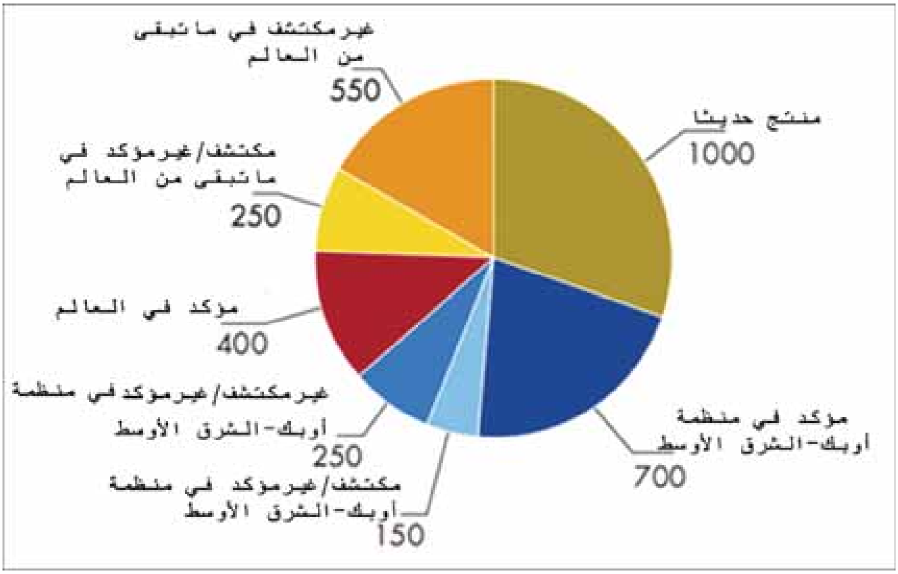


الشكل (2 ـ 2): عروض نتاج شركة إيكسون موبيل

غاز الفاسد يعني غاز يحوي كمية كبيرة من غاز كبريت الهيدروجين H_2S ممنوحة من قبل شركة أكسون موبل.

سنفحص في هذا الفصل، أولاً، المواقع الجغرافية الحالية والمستقبلية للموارد النفطية والغاز التقليدية الرئيسة، ثم المسائل المؤثرة في عملية استخراج هذه الموارد والحلول التقنية المستخدمة حالياً لرفع الإنتاج إلى الحد الأقصى.

يوضح الشكل (2 ـ 3) انهيار النفط التقليدي القابل للاستخراج بشكل تقاني، طبقاً لتقويم هيئة المسح الجيولوجي الأميركية في عام 2000. ومن المفيد تذكّر أنه طبقاً لتقديرات دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004 فإن الحاجة التراكمية للنفط بين 2003 و2030 ستصل تقريباً إلى 1000 مليار برميل، أي حوالى الكمية نفسها التي جرى إنتاجها. ويصوّر الشكل بوضوح أهمية الاحتياطي المؤكد لمنظمة أوبك في الشرق الأوسط في معادلة الإمداد من أجل الـ 25 سنة القادمة.



الشكل (2 ـ 3): النفط الدولي التقليدي القابل للاستخراج بشكل نهائي مقدّراً بمليار برميل

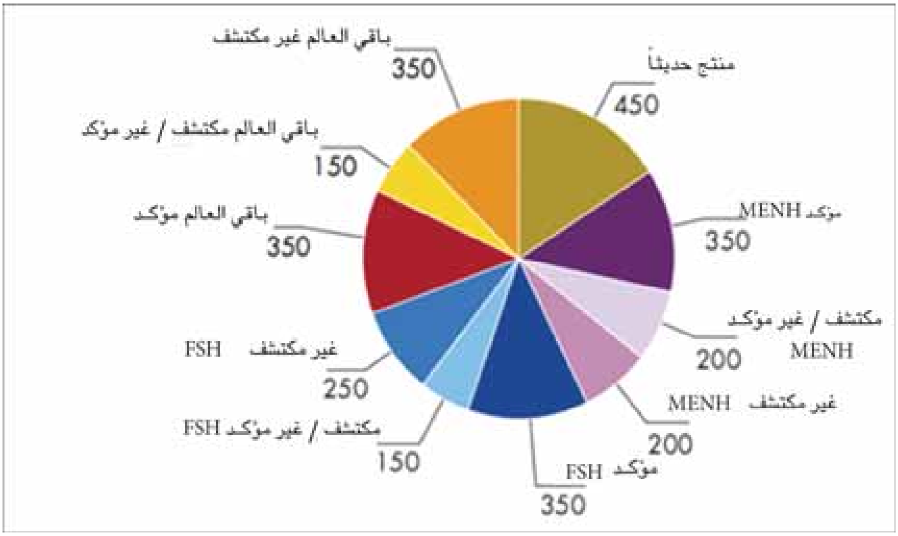
إن تصنيف «مكتشف/ غير مؤكد» يتوافق مع تصنيف هيئة المسح الجيولوجي الأميركية «نمو الاحتياط» (انظر الصندوق 11). الأرقام مأخوذة من تقويم هيئة المسح الجيولوجي الأميركية للعام 2000. وقد تم تجديدها لتأخذ بعين الاعتبار الإنتاج والتغيرات في الاحتياطي بين عام 1996 (السنة المرجعية لدراسة هيئة المسح الجيولوجي الأميركية) وعام 2003.

(استناداً إلى بيانات هيئة المسح الجيولوجي الأميركية وتحليل الـ IEA).

يعرض الشكل (2 ـ 4) انهياراً مشابهاً لموارد الغاز التقليدي، باستخدام أسلوب مشابه، كما في الشكل (2 ـ 3). وقد جرى تحويل كميات الغاز إلى براميل من مكافئ برميل نفطي، بحساب 6,25 مكافئ برميل نفطي لكلّ ألف متر مكعب. ونلقي الضوء هنا على دور منطقتين رئيستين: الاتحاد السوفياتي السابق، ومنطقة الشرق الأوسط/ شمال أفريقيا (MENA). يبلغ الطلب العالمي التراكمي بين عام 2003 و2030 حوالى 600 مليار مكافئ برميل نفطي. ولا تبلغ أهمية توفر احتياطيات الغاز التقليدي لتلبية هذا الطلب المتوقع أهمية توفر احتياطيات النفط. وكما سنرى في الفصل الخامس فإن نقل الغاز سيكون المجال الذي سيكون فيه للتقانة تأثير أكبر.

لكي نناقش وضع الإمداد بصورة معمقة ونحدد بدقة المسائل التقانية المطلوبة، فقد جرت معالجة النفط والغاز التقليديين في فصول منفردة في

الأسفل حيث تم التعامل مع أوبك الشرق الأوسط ومناطق أخرى.



الشكل (2 ـ 4): الغاز الدولي التقليدي القابل للاستخراج بشكل نهائي مقدراً بمليار مكافئ برميل نفطي

اعتماداً على بيانات USGS، بيانات Cedigaz، وتحليل IEA.

منظمة أوبك في الشرق الأوسط

يمتلك عدد من الدول احتياطياً مؤكداً ضخماً ونسبةً كبيرةً من الاحتياطي المؤكّد للإنتاج مترافقاً مع تكاليف إنتاج منخفضة. تقليدياً هذه الدول هي دول أوبك في الشرق الأوسط (مثل السعودية التي تملك احتياطي يكفي 80 سنة من معدل الإنتاج)، وكذلك دول أخرى مثل فنزويلا. ينصبّ تركيز هذه الدول الرئيس على الاستثمار الحذر طويل الأمد لاحتياطياتها وعلى معدلات الاستخراج القصوى، وعلى زيادة عائداتها النفطية في المستقبل البعيد. وتمارس هذه الدول احتكاراً جزئياً، وتحاول تحسين عائداتها قصيرة الأمد عن طريق ممارسة النفوذ الذي يمنحها إياه الاحتكار. وتحتاج تقانتها الرئيسة إلى الارتباط مع إدارة الاحتياطي وتحسينات في عمليات الاستخراج. وقد جرت مناقشة ذلك بشكل مطول في قسم «الاستخراج المحسّن» من هذا الفصل. وتمتلك هذه الدول، في كل الاحتمالات، موارد أخرى مهمة غير مستكشفة. غير أن حافزها

للتنقيب عن هذه الموارد وتطويرها معتدل نوعاً ما في ظل معدلات إنتاج الاحتياطي المريح.

على الرغم من أنها لا تبتدع اتجاهات التقانة، فإن بعض هذه الدول مثل السعودية والإمارات المتحدة نشطة في تتبع آخر التطورات التقانية التي تأتي من شركات دولية والتمكن منها من أجل تعديل إدارة الكلفة والاحتياطيات. وتشمل الأمثلة الاستخدام الموسّع لشركة أرامكو السعودية للآبار الأفقية والابار متعددة الجوانب في ما يُعتبر «أسلوب التماس الأقصى باحتياطي النفط» (Saleri, 2004). ولاتزال دول أخرى (إيران، العراق، أو ليبيا) متخلّفة عنها بسبب الحظر الماضي أو الحالي على امتلاكها التقانة. ويمكن أن تستفيد كل الدول كثيراً من التطورات المختلفة المذكورة في أقسام أخرى من هذا الفصل.

يعرض السيناريو المرجعي في دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004 أن إنتاج النفط لأوبك في الشرق الأوسط من الآن حتى 2030 سيزداد إلى أكثر من الضعف، لذلك فإن حصول منتجي الشرق الأوسط على المدى الطويل على آخر التقانات سيكون صعباً، حتى في السيناريو البديل الذي يتضمن الحد من الاعتماد على دول أوبك الشرق الأوسط.

إن الشراكة بين منتجي ومطوري التقانات ستبقى أساسية للحفاظ على سلامة الإمداد لدول الـ IEA والعالم بأسره. ويمكن الحصول على تفاصيل أكثر عن الإمداد المستقبلي في الشرق الأوسط ومنطقة شمال أفريقيا من النسخة المقبلة من دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2005. ومن الممكن أن القدرة المحسّنة، في هذا المنطقة، على رصد حركات السوائل بين الآبار، هي التطور التقاني الأكثر أهمية في المستقبل. وهناك دوافع مهمة لذلك، إذ إن المنطقة تتمتع باحتياطيات ذات كميات كبيرة يستخرج النفط منها ببطء نسبياً في محاولة لزيادة الاستخراج طويل الأمد باستخدام عدد محدد من الآبار، فمثلاً، تحصل عدة احتياطيات نفطية كبيرة في الشرق الأوسط على مخرجاتها من خلال «الغمر المحيطي للمياه»، وهي تقانة يحقن فيها الماء من حواف الاحتياطي النفطي للحصول على قوة دفع بطيئة، ولكن، شاملة لكل الاحتياطي النفطي. على العكس من ذلك، يُستخدم نموذج «المواضع الخمسة» التقليدي في كثير من الدول الأخرى، إذ تحاط كل بئر منتجة بأربع آبار حاقنة قريبة نسبياً من بعضها بعضاً، وهذا يضمن دفعاً سريعاً نسبياً للنفط بواسطة

الماء وإنتاجاً سريعاً للنفط ونتائج مفضلة في مجال القيمة الحالية الصافية.

لا تعتبر البئر مجرد قناة لحقن وإنتاج السوائل فقط، بل هي قناة رئيسة لمعرفة ماذا يحصل فعلياً في الاحتياطي النفطي؛ هناك عيوب في طريقة الغمر المحيطي للمياه. إذ عندما يوجد عدد قليل من الآبار المتباعدة فإن تتبع حركة السوائل في الاحتياطي النفطي تكون محدودة، وهناك فرص أقل لشرعنة نماذج الاحتياطي النفطي. ويمكن لهذا الأمر أن يؤدي أحياناً إلى مفاجآت غير سارة عندما يتراجع الإنتاج فجأة على نحو غير متوقع. وهذا أمر يتعلق بالاحتياطيات الكربوناتية التي يمكن أن تحصل فيها حوادث بارزة تؤدي إلى تصدّعات غير واضحة في تجانس التشكيل. (انظر إلى قسم «الاستخراج المحسّن» في ما بعد).

لقد أدى حدوث ظاهرة كهذه في حقل يبال في عُمان إلى مناقشة موسّعة (Mijnssen, 2003). على الرغم من احتواء هذا الحقل على عدة آبار، فإن معلومات مراقبة البئر المكتسبة وغير الكافية أدّت إلى الإخفاق في تحديد مناطق التصدعات ما أحدث مساراً عالي النفاذ للمياه لتتجاوز ما تبقى من النفط. وقد أدى حفر الآبار بشكل أفقي إلى تقاطعها مع هذه المناطق، ما ساهم في انخفاض مفاجئ في إنتاج النفط. وتراجع الإنتاج من 225000 برميل يومياً في عام 1997 إلى 95000 برميل يومياً في عام 2001. إن المثير للاهتمام هو تمييز المشكلة التي أدت إلى خطط جديدة وفّرت زيادة في عامل الاستخراج من 40 في المئة إلى أكثر من 50 في المئة.

لقد جرى وصف تطورات أكثر في التقانات تحت عنوان «الاستخراج المحسّن» (خاصة المسح الزلزالي رباعي الأبعاد ومسوح عبر البئر)، وقرنت مع حفر آبار للمراقبة بكلفة منخفضة حصرياً من أجل الحصول على معلومات. ومن المتوقع أنها ستؤدي دوراً مهماً في الإدارة المستقبلية لاحتياطيات الشرق الأوسط النفطية.

المناطق الأخرى

لقد عبرت معظم الدول الأخرى ذروتها في إنتاج النفط التقليدي[1]، أو أنها ستعبرها قريباً. إن عالمها هو عالم من حقول النفط الناضجة. وإن تنقيبها

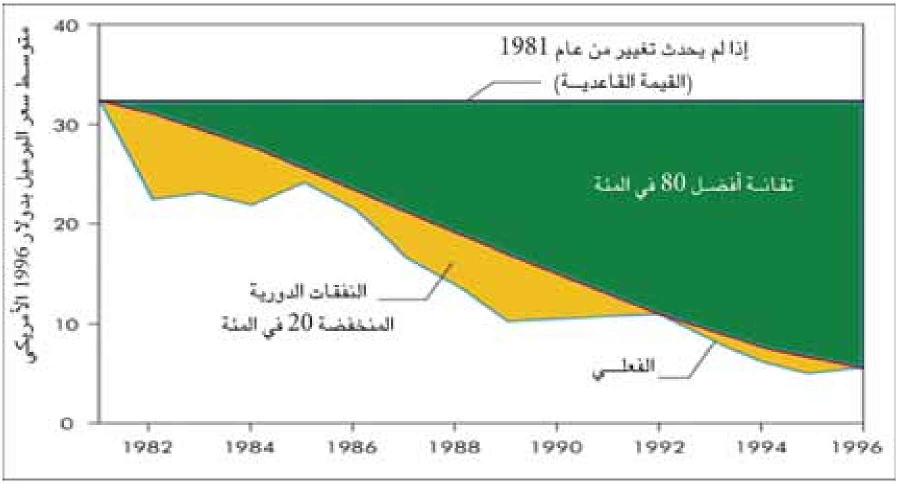
(1) روسيا ودول الاتحاد السوفياتي سابقاً حالة خاصة، نوقشت باختصار في الصندوق 3.

عن النفط وكلفة إنتاجهاعالٍ تقليدياً، غير أنها تحدّ من التأثير الاحتكاري لمنظمة الأوبك. وهكذا فإنها تعمل بهوامش صغيرة. ولذلك فإن تخفيض الكلفة مبعث قلق دائم لها.

إن معدلات الاحتياطي/الإنتاج المؤكد تكون قليلة، ويبلغ المتوسط حوالى 15 سنة، فيما يتراجع الإنتاج في الحقول القديمة. والتحديات هي:

● جعل الاحتياطي غير المؤكّد في الاحتياطيات المعروفة اقتصادياً أنها قابلة للنمو عن طريق تخفيض كلفة الإنتاج، والحفاظ على كميات الإنتاج لأطول فترة ممكنة، ومحاربة انخفاض المنحنيات.

● اكتشاف احتياطيات جديدة أكثر في ما تبقى من احتياطات غير مطوّرة أو احتياطيات هيدروكربونية غير مكتشفة يكون اكتشافها واستثمارها أصعب. وهناك أحد المناطق التي تبشّر باكتشافات جديدة (المياه العميقة، القطب الشمالي) نوقشت لاحقاً في فقرة «الموارد التقليدية الجديدة». ويُعتبر جذب الاستثمار لهذه الموارد المتبقية الضخمة الأكثر كلفة من أحد التحديات.



الشكل (2 ـ 5): تأثير التقانة في الكلفة في مياه الولايات المتحدة

توصلت التحسينات التقانية إلى خفض 80 في المئة من الكلفة في الـ 15 سنة فيما وصلت دورة الكلفة إلى 20 في المئة.

تقدمة: شركة شل

المصدر: شركة بحث الطاقة كمبردج.

بخصوص النقطة الأخيرة، ستكون إحدى المسائل الرئيسة للـ 25 سنة القادمة كيفية جذب رأس مال كافٍ لضمان إمداد كافٍ من وقود النفط الأحفوري، كما أشارت إليها في دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** للعام 2003 وعام 2004). من جهة أخرى، يفترض السيناريو المرجعي لدورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** للعام 2004 بيئة تسويق متوازنة نسبياً ومعتدلة بشكل واضح بأسعار تتراوح بين 22 و29 دولاراً أميركياً لكل برميل. وسيكون من الممكن جذب رؤوس أموال كبيرة بأسعار متوسطة فقط إذا كانت كلفة التنقيب والإنتاج والنقل وتحويل الهيدروكربونات منخفضة بشكل كافٍ لضمان مردود ملائم لرأس المال.

فيما ينتقل إنتاج الهيدروكربونات إلى مجالات أكثر صعوبة، فإن العبء سيتركز بقوة على التقدم التقاني للحدّ من ازدياد الكلفة. وحتى مع وجود الاحتياطي المؤكد، الذي هو مربح من حيث التعريف باستخدام التقانة الحالية وبالأسعار الحالية، فإن من الواجب نقل استثمار رأس المال الأساسي في أي حال لاستخراج الهيدروكربونات. وإذا ما كان لابد من الحصول على رأس المال فسيكون من الضروري خفض الكلفة بشكل أكبر من أجل زيادة مردود رأس المال. وقد مُثّل في الشكل (2 ـ 1) إلى أيّ درجة يعتبر هذا الأمر مهماً. وسيتراجع الإنتاج الحالي بسرعة كبيرة إذا لم يدعّم باستثمار جديد.

كان التقدم التقاني على مرّ السنين عاملاً رئيساً في ضبط كلفة التنقيب وإنتاج النفط والغاز. وقد كان للتقدم الكبير في الثمانينيات والتسعينيات، مثل المسح الزلزالي ثلاثي الأبعاد والآبار الأفقية، تأثير دراماتيكي في الصناعة. ويعرض الشكل (2 ـ 5)، مثلاً، تقويماً لدور التقانة في خفض كلفة الإنتاج البحري قبالة الساحل في الولايات المتحدة.

حين يجري اعتبار المنهجية المستقبلية، يجب عدم نسيان أنه من غير الممكن خفض فعالية الكلفة لبعض التقانات المتقدمة بشكل مفاجئ، إذ إنها تغطّي تحسينات صغيرة عديدة في كلّ جوانب نشاطات الصناعة. ومع ذلك يمكن تمييز ثلاث مجالاتة: آبار منخفضة الكلفة، وتقانات الحقول الذكية (i-field)، والمقاييس الاقتصادية الممكنة في الحقول الناضجة. وقد جرى مناقشة كلّ منها على حدة في الأسفل.

الصندوق 3
روسيا ودول الاتحاد السوفياتي سابقاً

تستحق روسيا ـ وإلى حدٍّ ما بعض دول الاتحاد السوفياتي ـ ذكراً خاصاً بما أنها غير بارزة في النقاش في الأعلى، المركّز على أوبك الشرق الأوسط والمناطق الأخرى. غير أنها مع ذلك، تمارس دوراً رئيساً في إمداد العالم بالنفط والغاز.

النفط

تملك روسيا احتياطياً نفطياً كبيراً جداً (دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** للعام 2004)، يصل إلى 70 مليار برميل من الاحتياطي المؤكد، بالإضافة إلى ما لابدّ أنه يوازي ذلك في احتياطيات نفط غير مؤكدة كموارد. وإضافة إلى ذلك، تملك روسيا مخزوناً يتجاوز الـ 100 مليار برميل من النفط غير المكتشف في المناطق الشرقية الشاسعة غير المستكشفة من سيبيريا والشواطئ الشمالية والشواطئ الشرقية. وقد تراجع الإنتاج بسرعة في بداية التسعينيات، بعد ذروة الثمانينيات، قبل القيام مرة أخرى باكتشافات مهمة بين 1997 و2004. وترافقت الزيادة الحالية في الإنتاج بشكل كبير مع إدخال التقانات الحديثة بعد تدفق الخبرات والخبراء الغربيين.

مازالت البنية الحالية للصناعة في طور التغيير، بينما يؤدي كلٌّ من القطاعين الخاص والعام أدواراً مهمة. وهذا يشبه إلى حدٍّ ما دول الشرق الأوسط المنتجة، إذ تجلب الدولة رؤى سياسية بقوة إلى الصناعة، غير أن الشركات الخاصة تقوم بإدخال تقانات أكثر حداثة.

على الرغم من بقاء تباعد كبير في الاستخدام الواسع للتقانات التي تمّ تطويرها في الدول الأخرى، فمن الممكن ظهور إبداعات داخل روسيا نفسها بسبب ميّزات البلد؛ احتياطيات بعيدة، مسافات نقل كبيرة، صعوبة المناخ، قوة عاملة متعلمة بشكل كبير، عمالة وتجهيزات صناعية أقلّ كلفة. ومن الممكن في ظل بيئة اقتصادية وسياسية صحيحة، أن تؤدي روسيا دوراً رئيساً في التنقيب عن النفط وابتداع الإنتاج في العشرين سنة القادمة، بدءاً بتقانات محلية ذات كلفة كافية مصنّعة حسب المواصفات المطلوبة، يمكن تصديرها في ما بعد وتطبيقها في مناطق أخرى.

الغاز

كما عرض في الشكل (1 ـ 9) (الفصل 1)، تملك الحكومة الروسية

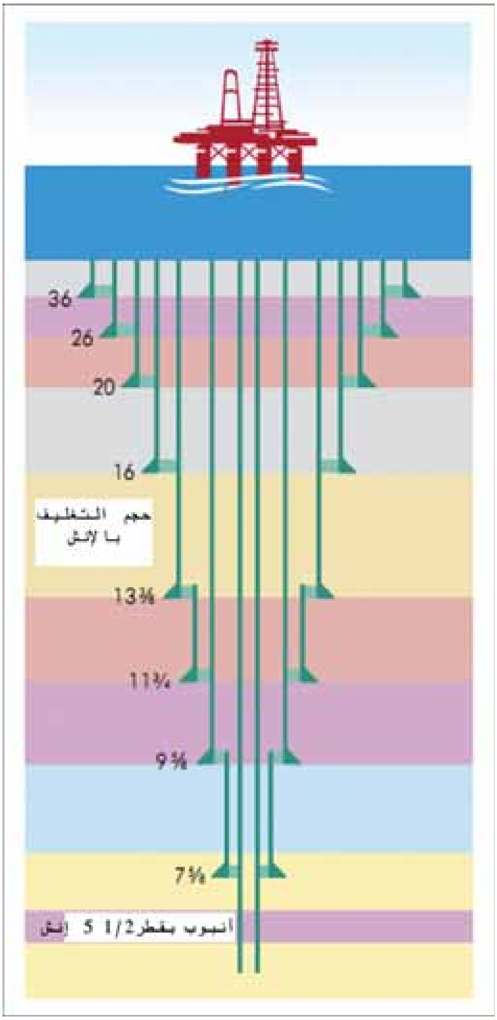
ودول الاتحاد السوفياتي السابق ثلث احتياطي الغاز المؤكد في العالم، ومن الممكن أنها تمتلك جزءاً مماثلاً من موارد الغاز التقليدي. كما تمتلك إمكانيات لا بأس بها من الغاز غير التقليدي (بشكل خاص طبقة فحم الميثان والهيدروميثان، انظر الفصل 4). وتعد روسيا ـ ومن المرجّح أن تبقى ـ المصدر الأول لتلبية حاجة الدول الأوروبية للغاز. ويوجد كذلك اهتمام قوي من قبل الصين واليابان للتزوّد بإمدادات الغاز من شرق روسيا ودول الاتحاد السوفياتي السابق المنتجة للغاز مثل كازاخستان وتركمانستان.

تسيطر الشركة الحكومية غاز بروم (gazprom) على قطاع الغاز بشكل كبير. وعلى رغم من بروز شركات مستقلة منتجة مثل نوفاتك (novatek)، تستمر شركة غاز بروم في الهيمنة على احتكار النقل المسافات البعيدة لأداء دور في كل المشاريع الرئيسة. حالياً، يأتي معظم الإنتاج من الحقول العملاقة المعمّرة القليلة مثل ميدفيزهيا medvezhye))، وأورينغوي (urengoy)، ويمبورغ (yamburg)، التي باتت على وشك استبدالها بحقول جديدة غير مطوّرة في الأعوام القليلة. وقد تمكّنت غاز بروم من تشغيل حقل زابوليار (zapolyar) الشاسع في عام 2003. وتُجري الشركة محادثات موسعة مع شركاء غربيين محتملين لتطوير حقل شتوكمان (shtokman) السوبر عملاق في بحر بارينتس. ومن المتوقع أن يحتاج استثمار هذا الحقل إلى رأسمال يتجاوز العشرين مليون دولار أميركي. وحتى الآن، بقيت مشاركة الشركات الدولية لحقول جزيرة ساخالين (sakhalin) في الشرق الأقصى محدودة جداً.

وكما هو الحال في النفط، تكوّن عوامل مثل البعد، والمناخ، والمسافات الطويلة في الأسواق حاجة كبيرة لتقانات جديدة في القطاع. ويوجد لشركة غاز بروم تقليد عريق في الاستثمار الداخلي في التقانة مع عدة مختبرات البحث والتطوير النشطة. وقد كانت الشركة بطيئة نسبياً (مقارنة بقطاع النفط) في تبنيها لممارسات التقانة الغربية. ويعتقد الكثير من الخبراء، ما عدا التنمية الصعبة للاحتياطيات البحرية قبالة الساحل (ساخالين) وشتوكمان التي من أجلها تعتبر روسيا، التقانة الغربية ضرورية، أن الاستخدام المناسب للتقانة المبتكرة يمكن أن يكون مفتاحاً لتحقيق إمكانية ضخمة جداً لتحسينات الكفاءة واستخراج الغاز في الحقول الموجودة، وكذلك في نظام النقل. وأما كيف ومتى يمكن تلبية هذه الحاجة إلى التقانة والاستثمار، فإنه يعتمد بشكل كبير على كيفية تطور بنية صناعة الغاز بشكل تدريجي في روسيا.

آبار منخفضة الكلفة

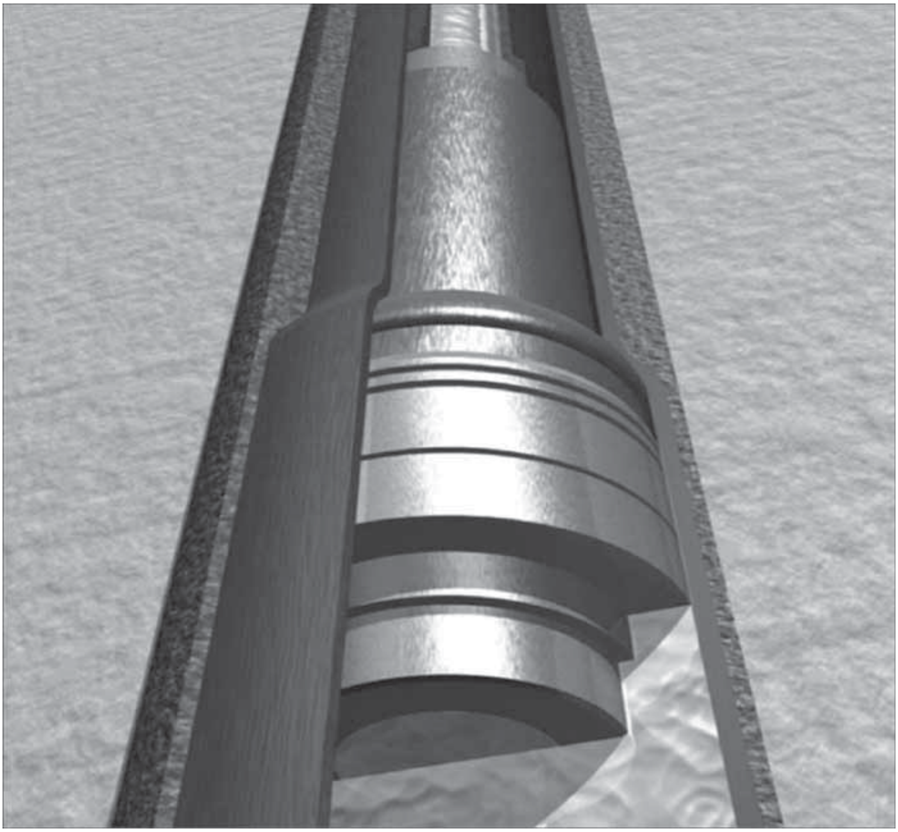
يتطلب بناء الآبار ومنشآت السطح أكبر نصيب من الكلفة، على الرغم أنه من المرجح أن تنخفض كلفتهما، إذ إن حفر الآبار يمكن أن يكون المسؤول الأكبر عن التغيرات الجذرية. (منشآت السطح البحرية قبالة الساحل معرّضة أيضاً لتغير كبير، كما سيناقش لاحقاً تحت عنوان «موارد تقليدية جديدة»). إن للصناعة تاريخاً مع ابتكار الحفر. ويمكن حالياً الاستشهاد بابتكارين ذوَي إمكانية عالية.



الشكل (2 ـ 6): مثال لبناء بئر تقليدية يوضح تناقص القطر مع العمق

تقدمة: شركة شلمبرغر.

■ «تغليف الحفر»، ويحتوي على استخدام أنابيب التغليف بدلاً من أنابيب الحفر العادية خلال عملية الحفر. ويتكون التغليف من مجموعة من الأنابيب المعدنية تلصق بالصخور في نهاية عملية الحفر لإبقاء الحفرة في مكانها. وعلى الرغم من أن هذه التقانة تعرض بعض التحديات بالنسبة إلى الثبات الميكانيكي، فمن الممكن أن تقتصر على الآبار الضحلة نسبياً، إذ إن تغليف الحفر هو عبارة عن وسيلة تحافظ على خطوات مختلفة في بناء البئر.



الشكل (2 ـ 7): مخطط للتغليف (أزرق) وسّع بواسطة آلة توسيع سحبت من الأسفل إلى الأعلى

تقدمـة: شركة شل.

■ توسيع التغليف، وهو تقانة جديدة يمكن أن تفتح الطريق أمام إتمام الهالة المقدسة«قناة واحدة» (يجري الإتمام في آخر مرحلة من بناء البئر). هنا تملك البئر

العميقة المشيدة نفس القطر من القمة حتى القعر. وأما في بناء البئر التقليدية، فإن الحفرة تبدأ بقطر كبير في القمة ويتناقص قطر الحفرة شيئاً فشيئاً كلما انتقلنا إلى الأعماق (الشكل 2 ـ 6)، فمثلاً، إذا كان قطر الحفرة المطلوبة 20 سم عبر منطقة الإنتاج، تبدأ البئر، في هذه الحالة، على السطح بقطر حفر 80 سم. وتقدم بئر القناة الواحدة إيجابيات منها: التقليل من الطاقة للحفر، وتقليل مخلّفات الحفر، وإنقاص حجم منصة الحفر. وتعتمد التقانة المتطورة الأكثر حداثة للتوصل إلى هذا الأمر على نقل النفط بالأنابيب المعدنية التي يمكن إدخالها في البئر وتوسيعها في المكان المنشود لتتلاءم مع حجم الحفرة شكل (2 ـ 7). وتشكل الموارد المتطورة حجر الأساس لهذه العمليات، ومن المرجح أن تتابع تطورها.

تقانات الحقول الذكية (i-field) أو الحقول الإلكترونية (e-field)

هي صنف واسع من التقانات تدعى أيضاً بعمليات الزمن ـ الحقيقي-real) (time processes، أوتقانات حقل النفط الذكي (SOFT)، أو تقانات حقل النفط الرقمي. وتعتمد تقانات كهذه بشدة على التقدم في الإلكترونيات وتقانات الاتصالات/ والمعلوماتية[2]. ويستلزم الأمر عدة مفاهيم يجري بواسطتها وضع مجسّات وأجهزة تشغيل في الآبار أو على السطح للمراقبة المستمرة للاحتياطي النفطي لمعرفة ما يحدث في داخله، إذ إن هذه الأجهزة تعيد بث المعلومات في الزمن الحقيقي إلى غرفة التحكم حيث تقارن القياسات بنماذج رقمية معقدة، وتُعدّل العملية باستمرار. وقد نوقشت هذه التقانات بتوسع في الصناعة في العشر سنوات الماضية. وعلى الرغم من وجود عدة مركبات، لكن الإمكانيات الكاملة لهذه التقانات تطبق ببطء نسبياً، إذ إنه من الصعب تقويم مردود الاستثمار مبكراً. ومع ذلك، من المتوقع أن تحوّل هذه التقانات الصناعة في العشرين سنة القادمة، وأن تساهم بشكل مهم في توجيه تخفيض الكلفة (وكذلك تخفف من الضعضعة الحالية لرأس المال البشري وتساهم في عوامل الاستخراج المتزايدة).

اقتصاديات مقياس الحقول الناضجة

ستسهّل هذه الاقتصاديات انسيابية العمليات كثيراً. وفيما تنضج الحقول

(2) لإلقاء الضوء على الدور الرئيس لتقانة المعلومات الحديثة في أعلى سلسلة صناعة النفط والغاز يكفي أن نلاحظ بأن الشركات الزلزالية تشغل أكبر حواسب المعالجة بالتوازي خارج الميدان العسكري. وتتصدر عدة شركات كبرى في أعلى سلسلة الإنتاج استخدام الشبكات الحاسوبية.

المنتجة، فإنها عادة ما تحتوي على عدد كبير من الآبار قريبة من بعضها بعضاً. ويفتح هذا الأمر المجال من أجل عمليات انسيابية بطرق أكثر انتظاماً من الماضي. إن الاتجاه واضح جداً الآن في الولايات المتحدة في الحقول الموجودة على اليابسة، إذ يبدو أن انسيابية كهذه ستصبح أكثر انتشاراً في الحقول حول العالم. فقد أصبحت عمليات في الآبار مثل الحفر، الإتمام والتحفيز عمليات تقليدية تنفّذ على التسلسل، بمشاركة عدة أشخاص أو متعهدين يحضرون تجهيزات مختصة لإنجاز كل خطوة من الخطوات العديدة في العملية. وهذا الأمر مناسب جداً في حالة الحقول الجديدة البعيدة التي تعدُّ كلّ بئر فيها حالة خاصة. غير أنه في الحقل الناضج الذي يوجد فيه عدة آبار متشابهة، فهناك فرص كثيرة لتطوير عمليات نموذجية تكامل الخطوات العديدة، وتحدّ من الكلفة بشكل مهم. ويوضح الشكل (2 ـ 8) أسلوباً كهذا.

الشكل (2 ـ 8): معدات جديدة لخدمات الإتمام المتكاملة

تستطيع قطعة واحدة من المعدات الآن إنجاز أعمال عديدة في الوقت نفسه عندما يبنى البئر ويصبح كاملاً، استبدال سلسلة من المهمات كانت تنفذ سابقاً على التتابع وكانت تتم غالباً بمشاركة عدة متعهدين.

تقدمة: شركة شلمبرغر.

من المرجح أن للانتقال إلى عالم حقول ناضجة تأثيراً كبيراً في التطور التقاني. وسيكون هذا الأمر مهماً، مثلاً، مع منشآت عديدة في حقول ناضجة بحرية قبالة الساحل من الممكن أن تصل إلى نهاية حياتها الاقتصادية والتقنية. وأكثر أهمية سيكون من ذلك ستكون التقانات التي توفر مخلفات بيئية صديقة آمنة ـ أو على العكس من ذلك من أجل توسيع الحياة المفيدة عن طريق سد بقايا جيوب الهيدروكربونات الصغيرة ـ أو من أجل التحول إلى أهداف جديدة مثل الاحتباس الأرضي للـ CO_2.

الاستخراج المحسّن

ما هو الاستخراج؟

عندما يستخرج النفط الذي يملأ مسامات الصخور الرسوبية التي تشكل الاحتياطي النفطي، فإنها تحتاج أن تعوض بشيء آخر. ويمكن أن تكون الاستعاضة بالسوائل الموجودة في الاحتياطي النفطي، مثل الماء الموجود تحت النفط، أو الغاز الموجود فوق النفط أو بمحلول. تسمى آلية إنتاج النفط هذه بالاستخراج «الأولي». غير أنه يمكن حقن الماء أو الغاز إلى احتياطي النفط أيضاً من أجل استبدال أو إزاحة النفط. ويسمى هذا بالاستخراج «الثانوي»، مع أن العمليات غالباً ما تستمر من بداية الإنتاج. وأخيراً، يمكن حقن مواد أكثر تعقيداً (محلولات بولمرية في الماء، وبخار، وميكروبات) وتسمى هذه بالاستخراج «الثلاثي». ولا حاجة للقول إن المواد المحقونة يجب أن تحمل كمية أقل من النفط المستخرج.

بينما تتنوع الأرقام بشكل كبير، بالاعتماد على صفات احتياطي النفط، يمكن أن يصل استخراج النفط الأولي إلى 10 ـ 30 في المئة من النفط الموجود. وأما الاستخراج الثاني فإنه يضيف من 10 في المئة إلى 30 في المئة (يصل المجموع إلى 30 ـ 50 في المئة). ويتطلب استخراج أكثر من 40 في المئة من احتياطي النفط عادة خطوات إضافية في طريق الاستخراج الثلاثي الذي يمكن أو لا يمكن أن يكون اقتصادياً.

يشير الشرح الآنف إلى النفط. إن لاحتياطيات الغاز، نموذجياً، عوامل استخراج أعلى تبلغ من 70 في المئة إلى 80 في المئة، ولذلك نال الاستخراج المحسن في احتياطيات الغاز اهتماماً قليلاً. ومع ذلك توجد احتياطيات للغاز

مثل الاحتياطيات المزودة بطبقة سفلية خازنة للماء يكون الاستخراج فيها منخفضاً لأسباب مشابهة للأسباب في احتياطيات النفط. ويمكن تطبيق التقانات المناقشة في الأسفل في حالات كهذه.

التوجهات

من المعروف جيداً أن نصف إلى ثلثي معظم الاحتياطيات تتكون من الهيدروكربونات التي تترك في الأرض حين يُردم الحقل عندما يصبح غير اقتصادي. ويصل معدل استخراج النفط عالمياً في الوقت الراهن إلى حوالى 35 في المئة[3]. وهذا الأمر موضح في الشكل (2 ـ 9) في ما يخص الولايات المتحدة.

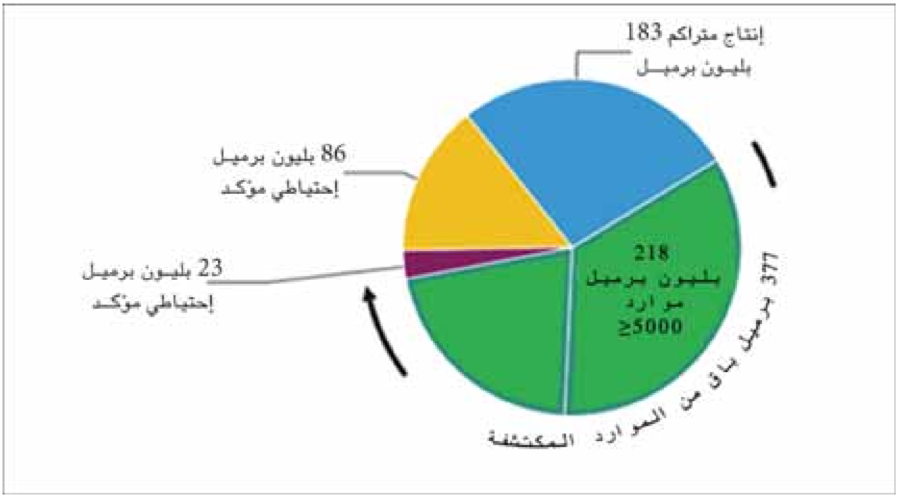
يصل معدل استخراج بعض الحقول الآن إلى 50 في المئة. مثلاً، كانت النرويج نشيطة بشكل خاص في زيادة مستويات الاستخراج كما في الشكل (2 ـ 10). ويبشر زيادة معدل الاستخراج إلى 45 في المئة عالمياً في الحقول الموجودة باحتياطي نفط «جديد» أضخم من الاحتياطي الموجود في السعودية. ويجب ملاحظة أن الفرضيات بشأن معدلات الاستخراج في تقويم هيئة المسح الجيولوجي الأميركية للاستخراج النهائي للهيدروكربونات الشكل (1 ـ 5) ليست موضحة، فهي تتضمن عامل «نمو الاحتياطي» للحقول المعروفة يستند إلى خبرة تاريخية في الولايات المتحدة. ويأخذ هذا في الحسبان كمية محددة من استخراج النفط المكثّف، إذ إن ضخ الـ CO_2 أوالاستخراج الحراري يستخدمان إلى حد كبير في الولايات المتحدة، ولكن ذلك لا يعكس إمكانيات التقانات غير المستخدمة، مثلاً تدفق البولمر أو ميكروبات الاستخراج المكثّف.

من أجل ذلك، فإن الزيادة الفعلية لمعدلات الاستخراج سوف تزيد كمية النفط القابل للاستخراج بشكل نهائي أكثر من تقويمات هيئة المسح الجيولوجي الأميركية. وقد جرت مناقشة تقويم هيئة المسح الجيولوجي الأميركية بتفصيل أكثر في الصندوق 11.

---

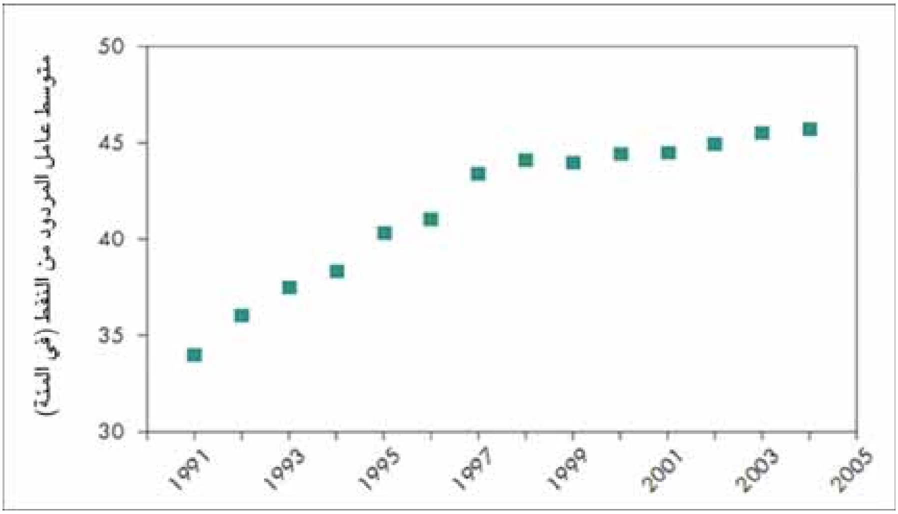
(3) الأعداد من هذه المرتبة عادة تقتبس، لكن نادراً ما تدعم بالمعطيات المتوفرة. في الحقيقة، أنه من الضروري أن تنظر إلى الاحتياطيات المهجورة التي تقيم النفط الأصلي في المكان (الذي يكون داعماً بشكل ما غير مؤكد) وقارنته بالإنتاج التراكمي الفعلي حتى الردم. أيضاً، بسبب أن مثل هذه التحاليل تنظر إلى الماضي، فليس من الضروري أن تأخذ بالحسبان الممارسات الحالية للتقانة الأكثر تقدماً. المعطيات المتوفرة معظمها من الولايات المتحدة.

من المعتاد التفكير في النفط المتبقي على أن له مركبين: «النفط المتجاوز» و«النفط المتبقي». وقد نوقشا، كلّ على حدة، في الأسفل.



الشكل (2 ـ 9): نفط غير مستخرج متروك في حقول الولايات المتحدة

عن قسم الطاقة في الولايات المتحدة؛ DoE, 2004 .



الشكل (2 ـ 10): تطور عامل الاستخراج المتوقع في النرويج

خط الـ 50 بالمئة هو الهدف المستقبلي للحكومة النرويجية.
تقدمة: مديرية النفط النرويجية.

النفط المتجاوز

يشير هذا المصطلح إلى الجيوب الكبيرة من النفط (أو الغاز) التي لم تستخرج بعد (الشكل 2 ـ 11). ويجري تطوير التقانات باستمرار من أجل الحد من النفط المتجاوز، ولتحديد الأماكن التي يبقى فيها وإنتاجه بكلفة فعالة. وتسمى هذه التقانات عادة «استخراج النفط المحسّن»[4]. من المتوقع أن تملك التطورات الحديثة، إضافة إلى الدور الملحوظ للتصوير الزلزالي رباعي الأبعاد أو دخول الحفر الجافة الجانبية ثانية، تأثيراً مهماً.

لقد نوقش المسح الزلزالي رباعي الأبعاد بشكل مختصر في الصندوق 4 (مرور الزمن). ويأتي المسح الزلزالي الآن في هذا العصر ليضم إمكانية لا بأس بها، بشكل خاص البحرية قبالة الساحل، حيث تكون كلفتها فعّالة. وتتضمن طريقة أخرى تثبيت اللواقط بشكل دائم في قاع البحر مثلاً. وقد ثبت كذلك أن هذه التقانة مفيدة جداً بالرغم من أن الكلفة الحالية استبعدت الأخذ المكثّف للعيّنات على اليابسة. وقد ثبت أن المسوحات رباعية الأبعاد الكبيرة غير مفضلة اقتصادياً. وسنحتاج إلى تخفيض أكبر لكلفة المسوح رباعية الأبعاد المكثّفة ذات النوعية الممتازة التي تجري على اليابسة إذا ما كانت هذه التقانة ستصبح ذات انتشار واسع.

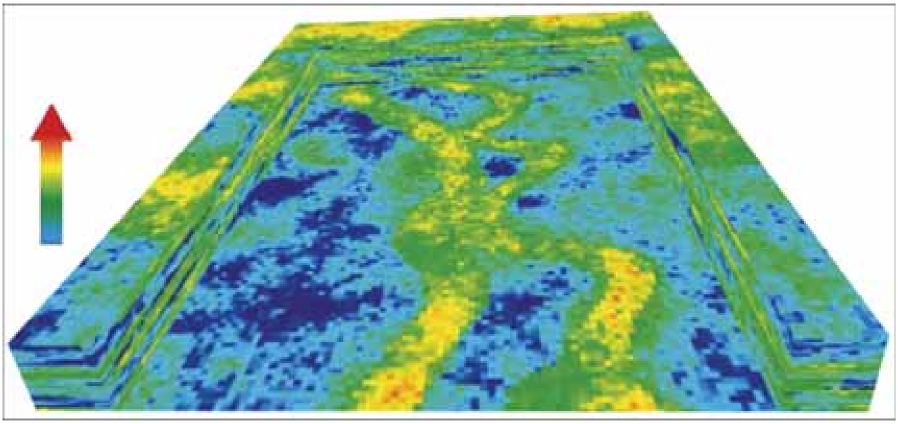
يعدّ المسح الكهرمغناطيسي (electromagnetic) على السطح (انظر الصندوق 5) طرائق فعالة جداً لتحديد الهيدروكربونات المتجاوزة، على الرغم من أنها تقتصر على الاحتياطيات الضحلة نسبياً. وتشمل الشركات النشطة في تطوير تقانات المسح الكهرمغناطيسي جديدة شركة إيكسون موبيل وشركة ستات أويل. ومع ذلك، فإننا نحتاج إلى تحسينات أكبر في هذا المجال.

يمتلك المسح عبر البئر، سواء أكان زلزالياً أم كهرمغناطيسياً، إمكانية أداء دور رئيس (الصندوق 6). فقد حافظ ذلك على التقانة الملائمة خلال العقدين التي وجد فيهما. وقد كانت القيود الرئيسة وجود الآبار ببعد مناسب في ما بينها (المسافة بين الآبار). هل سيبلغ هذا المسح مرحلة النضج؟ ربما سيهيمن على المستقبل في ما إذا جرى تثبيت مجسّات دائمة (منظومات من المقاومة النوعية أو اللواقط توضع

---

(4) التعاريف المستخدمة؛ استخراج النفط المحسّن من أجل استخراج النفط المتجاوز، واستخراج النفط المكثّف من أجل خفض المتبقي من النفط في مستوى المسامات ليست مقبولة عالمياً وتخلق بعض الالتباس. يكون استخراج النفط المكثّف بالنسبة إلى بعض المؤلفين جزءاً من استخراج النفط المحسّن، وبالنسبة إلى آخرين، فإن استخراج النفط المحسّن يوسّع ليشمل بشكل أساسي كل التقانات الحديثة من أجل إدارة جيدة للاحتياطي.

خلف التغليف)، مع أن تكلفة نصبها لاتزال عالية جداً لاستخدامها بصورة روتينية.



الشكل (2 ـ 11): النفط المتجاوز

أزاح الماء، بالأزرق، النفط إلى الخارج لكنه تجاوز بعض الأقنية التي تحوي نفطاً (التركيز العالي بالأصفر والأحمر والتركيز المنخفض بالأخضر). يمكن أن يترك النفط، مثلاً، بسبب القنوات ذات النفاذية الضعيفة.
هذا التوضيح، لا يستند إلى معطيات فعلية، أُعيد إنتاجه من (Yeten, 2002).
تقدمـة: فكري كوتشك (Fikri Kuchuk)، شركة شلمبرغر.

الصندوق 4
المسح الزلزالي رباعي الأبعاد

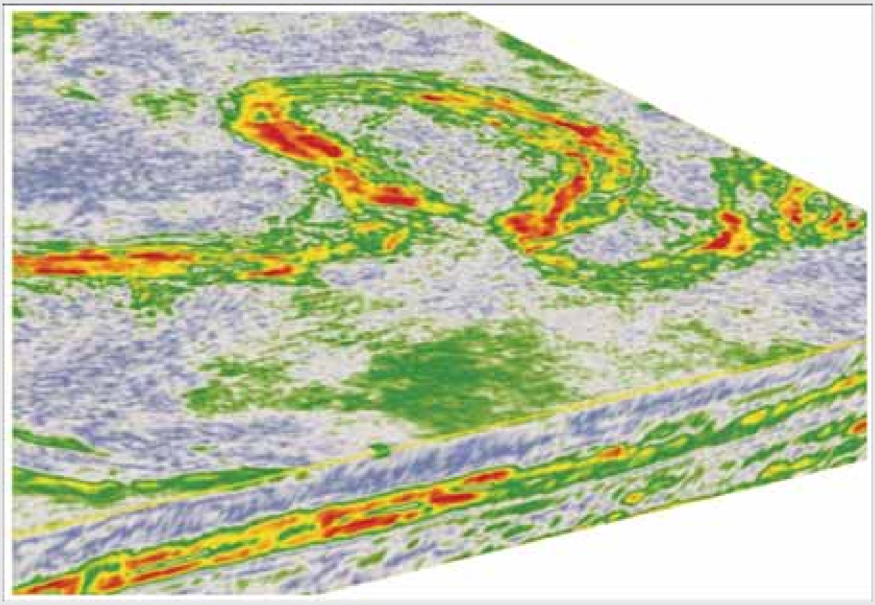
لقد كان المسح الزلزالي أحد الأدوات الرئيسة في التنقيب عن النفط والغاز وإنتاجهما. ويتكون هذا المسح من تحريك مصدر صوتي (يصدر أصواتاً) على سطح الأرض وتسجيل الإشارات الصوتية المنعكسة من باطن باستخدام منظومة من لواقط الصوت. وبما إن الحدود بين الطبقات الرسوبية المتتابعة تعكس جزءاً من الأمواج الصوتية، فإن المسح الزلزالي يجعل من الممكن إعادة تركيب صورة هندسية للطبقات الجوفية.

لقد أُخذ التسجيل الصوتي، بالأساس، على طول خط على السطح، معطياً صورة ثنائية البعد لشريحة عمودية لباطن الأرض. وقد أصبح المسح ثلاثي الأبعاد الذي يتم الحصول فيه على مقطع مكعب الشكل لباطن الأرض، وذلك عن طريق تحريك المصدر الصوتي واللواقط على شبكة ثنائية البعد على سطح الأرض، المعيار في العشرين سنة الماضية. وأدت التحسينات المستمرة في

نوعية التسجيل للإشارات الصوتية وفي معالجة البيانات إلى صور هندسية أخاذة للاحتياطيات (الشكل 2 ـ 12). وأصبحت جزءاً أساسياً من التنقيب وآلية الإنتاج.

تتألف التقانات الزلزالية رباعية الأبعاد من صنع مسح ثلاثي الأبعاد مكرر بفواصل زمنية منتظمة. وبما إن الشكل الهندسي لاحتياطي النفط لا يتغير، في الأساس، فإن الاختلاف ما بين المسوح المتتالية سيظهر حركة السوائل خلال الاحتياطيات، وبخاصة النفط الذي جرى تحديده وإنتاجه واستبداله بالماء. وسرعان ما ستصبح هذه أداة أساسية في عملية الإنتاج والاستخراج.

يوجد عائقان كبيران على هذه التقانات. العائق الأول هو أن الحلول المكانية تمنعها من تصوير تفاصيل أقل من حجم 50 م. وأما العائق الثاني فهو كلفة مسح كهذا. ويمكن إنجاز عمليات مسح كبيرة قبالة الساحل بكلفة مقبولة حيث تجرّ المصادر الصوتية واللواقط بواسطة قارب. ومع ذلك يجب تحريك اللواقط على اليابسة يدوياً، ما يجعل المسح الكبير مرهقاً ومكلفاً. ويعتبر الحل المحسّن وتقانات النصب المحسّنة مجالات بحث نشطة في الصناعة.



الشكل (2 ـ 12): صورة زلزالية ثلاثية الأبعاد (3D) لرَسوبيّات نهرية على عمق 3000 متر تحت السطح

تقدمة: شركة شلمبرغر

الصندوق 5
المسح الكهرومغناطيسي

على عكس المسح الزلزالي (الصوتي) الذي يستجيب بشكل أساسي للشكل الهندسي للاحتياطيات وإلى حد ما لطبيعة السوائل، فإن تقانات القياس الكهرومغناطيسية مناسبة جداً، مبدئياً، للتمييز عن بعد بين النفط والماء، لأن الصخور التي تحتوي على النفط تميل أن يكون لديها إيصالية كهربائية أقل بكثير من الصخور التي تحتوي على الماء. وقد استُخدمت هذه الخاصية بتكرار في السجلات البئرية (أخذ القياسات في الآبار) وهي جزء رئيس لأي تقويم للنفط الموجود. إن للقياسات الكهرمغناطيسية المأخوذة على السطح، لها أيضاً تاريخاً طويلاً، وقد استخدمت بكثرة في صناعة المناجم المعدنية[5]. غير أنه في صناعة النفط والغاز، حيث يتركز الاهتمام على الرَسوبيّات المدفونة في الأعماق، فإن العائق في الحلول المكانية ضعيفة المستوى مقارنة بالمسح الزلزالي، وهذا ما حال دون تطبيقها بشكل واسع. حالياً، ومع ذلك، جرى تنشيط الاهتمام بهذه التقانة بواسطة التقارب بين عاملين: قدرة القياسات وبروز سوق المياه العميقة. وأما في مجال المياه العميقة، فلاتزال الاحتياطيات المهمة عميقة جداً تحت سطح البحر، ولكنها ليست عميقة جداً تحت قاع البحر في الأغلب. ويفتح هذا الأمر الطريق أمام التقانات الحديثة للقياسات الكهرمغناطيسية باستخدام أجهزة توضع قرب قاع البحر لتصوير توزع النفط والماء ـ وسلوكهما بمرور الزمن ـ مع حلٍّ مقبول.

الصندوق 6
المسح عبر الآبار

في المسوح عبر البئر يوضع عادة المصدر الصوتي أو الكهرمغناطيسي في بئر والمستقبِلات المجانس في بئر أخرى قريبة. ويمكن الحصول من خلال ذلك على صورة هندسية لاحتياطي النفط و/أو تَوزّع السوائل في

(5) لاحظ أن المسح المغناطيسي الساكن له تاريخ طويل من الاستخدام في صنع الخرائط الجيولوجية: ويتركز اهتمامنا هنا على مسح الـ AC.

الفراغ بين الآبار. وبسبب قربها من احتياطي النفط، فإن هذه الصور يمكن أن توفّر حلاً مكانياً أفضل بكثير، فهي تُظهر تفاصيل دقيقة أكثر من الصور التي جرى الحصول عليها من السطح. من العوائق الرئيسة لهذا المسح هي الحاجة إلى دخول بئرين قريبين من بعضهما بعضاً، وفعل ذلك بدون اضطراب الإنتاج. وبما إن هذه التقانة تزوّدنا كذلك بشكل أساسي بمعلومات عن شريحة ثنائية البعد لاحتياطي النفط فقط، فإن استخدامها لإبلاغ قرارات الإنتاج يكون أصعب بكثير من الصور ثلاثية الأبعاد التي نحصل عليها بواسطة المسح الزلزالي السطحي. وقد جرى التدقيق بهذه التقانات التي أدخلت في الثمانينيات، غير أن قابليتها للتطور مازالت كبيرة.

هناك تقانة أخرى، تعرف بـ «التسجيل خلف التغليف». وقد وُصفت في الصندوق 7. وهي تقانة روتينية في هذه الأيام لها تأثير كبير في إعادة تقويم الحقول القديمة للطبقات غير المنتجة للهيدوكربون. وستستمر أهميتها بالازدياد بشكل مؤكد.

إذا ما تم تمييز النفط المتجاوز، فهو بحاجة إلى وسيلة للوصول إليه، إذ من الممكن أن يكون كلُّ جيبٍ متبقٍ صغيراً، ويمكن أن يتم ذلك بشكل اقتصادي فقط إذا كانت الكلفة منخفضة بما فيه الكفاية من أجل الحفر وإتمام آبار جديدة، وإعادة الدخول إلى آبار موجودة أو إنهاء حفر بئر جانبية، فمثلاً جرى إنجاز تقدم كبير بحفر أنبوب لولبي وإعادة الدخول إليه، غير أننا بحاجة إلى أكثر من ذلك، بخاصة قبالة الساحل (انظر إلى صندوق 8).

الصندوق 7

التسجيل خلف التغليف

تقليدياً، تُجرى القياسات المأخوذة في الآبار لوصف احتياطي النفط مباشرة بعد حفر البئر، وقبل تركيب الأنبوب المعدني (التغليف) في البئر. ومن هنا برزت تسمية قياسات «حفرة مفتوحة». وطوال العشرين سنة الماضية، طورت التقانات لإنجاز قياسات مشابهة بعد وضع التغليف.

ويوفر «التسجيل خلف التغليف» فرصاً عديدة للعودة إلى آبار كانت منتجة لبعض الوقت، أو مردومة، وإعادة تحليل كل من احتياطي النفط والتوزّع الحالي للسوائل (النفط، والماء، والغاز). تظهر هذه عادة إمكانية للإنتاج المحسن، والاستخراج المحسن من أجل بزل الهيدروكربونات في الطبقات التي لم يتم إنتاجها. يستخدم الجيل الأكثر حداثة من طرائق قياس المقاومية الكهربائية لخلف التغليف، مثلاً، آخر التطورات في الإلكترونيات لقياس التغيرات الصغيرة في المقاومية الكهربائية في الصخور خلف الأنبوب.

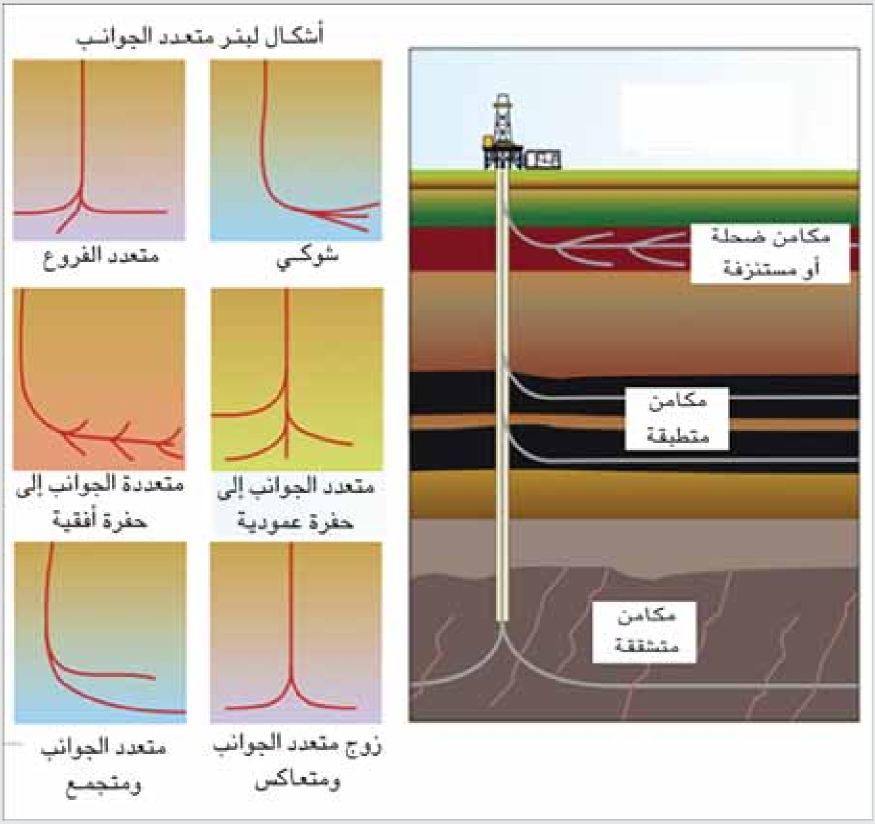
لقد تابعت الصناعة والتطورات التقدم في كلّ هذه المجالات بفعالية، ويُتوقع خلال السنوات القادمة حصول تقدم منتظم. وعلى الرغم من عدم وجود طريقة واضحة لقياس الزيادة في معدل الاستخراج، غير أنه يمكن أن ننظر إلى تجارب الشركات التي تبنّت أهداف استخراج ذات تحديات، وطبّقت باستمرار التقانات الحديثة، مثلاً في القطاع النرويجي لبحر الشمال. وتشير هذه التجربة إلى أنه من المتوقع أن يصل الاستخراج العالمي إلى 45 في المئة، مقارنة بـ 35 في المئة اليوم. ولدرجة ما، يعتمد تقدير كهذا عادة في معظم الحالات على إمدادات النفط والغاز المستقبلية (Rogner, 1997; Rogner, 2000; Greene, 2003; IEA-WEO-2004).

الصندوق 8

دخول الحفر ثانية: الحفر متعدد الجوانب، الحفر الحلزوني

تم مؤخراً جمع تقانات متعددة من أجل تأمين وسيلة وصول محسّنة مهمة إلى جيوب النفط المتجاوز. وقد كان أحد التطورات التقنية الكبيرة في الثمانينيات والتسعينيات تعميم الآبار المنحرفة والأفقية، وهي الآبار بدأت كحفرة تقليدية عامودية، ومن ثم استدارت وتابعت أفقياً لمسافة بلغت 10 كم. ويشمل هذا الحفر عادة حفرة أولية عمودية، يجري فيها اختيار نقطة الانحراف، ثم يعاد دخول الحفرة للبدء بحفر حفرة منحرفة من نقطة مختارة (بعملية تسمى الإقلاع). ويمكن تطبيق هذه التقانة كذلك على الآبار

القديمة، وذلك عن طريق دخول بئر قديمة ثانية والإقلاع بالجانب الأفقي للحفرة أو «حفرة التصريف» للوصول إلى النفط المتروك من دون الحاجة إلى حفر آبار جديدة على الإطلاق. وهذا التطبيق، معروف بـ «دخول الحفر ثانية»، ويكون نشاطاً متنامياً في حقول النفط المتداعية. ويمكن أخذ المفهوم أبعد من ذلك بدخول الآبار المنحرفة أو الأفقية ثانية، أو إلى بئر دُخل إليها ثانية مسبقاً وأصبحت بئراً «متعددة الجوانب». وقد طُوّرت هذه التقانة لهذا الهدف منذ منتصف التسعينيات. ومع أن هذه الطريقة ليست واسعة الاستخدام، غير أنه يبدو أنه لا يوجد حدود للتعقيد الهندسي الذي يمكن الوصول إليه (الشكل 2 ـ 13).



الشكل (2 ـ 13): شكل تخطيطي لآبار متعددة الجوانب

تقدمة: شركة شلمبرغر

الشكل (2 ـ 14): وحدة أنبوبية ملفوفة

تقدمة: شركة شلمبرغر

في الوقت الذي يعد فيه توفير الكلفة بدخول الحفر ثانية للوصول إلى النفط المتجاوز مهماً جداً، إذ لم يعد الحفر للدخول إلى آبار جديدة ضرورياً على الإطلاق، لاتزال منصات الحفر التقليدية الكبيرة المكلفة بحاجة إلى النقل من أجل دخول الحفر ثانية. وعلى الرغم من أن الحفر الأنبوبي الحلزوني ليس مقيداً بدخول الحفر ثانية، إلا أن له دوراً مهماً في هذا المجال.

بدلاً من استخدام أنبوب حفر بطول عشرة أمتار أو أكثر يحتاج أن يُرفع ويُربط ببعضه البعض كلما تقدم الحفر، يشمل الأنبوب الملفوف أنبوبَ حفرٍ ذا قطر صغير يمكن لفّه أو عدم لفّه حسب المطلوب (الشكل 2 ـ 14). ويعود الفضل في صنعه إلى التطورات في علم المواد التي سمحت بدخول الحفر ثانية بواسطة وحدة أصغر أكثر حركة وذات كلفة مقبولة أكثر.

النفط المتبقي

يشير هذا المصطلح إلى الهيدروكربونات التي تبقى في المسامات الصخرية الصغيرة بعد الاستخراج الثاني (الشكل 2 ـ 15). وهناك تقانات عديدة من أجل الاستخراج المكثّف للنفط المتبقي، ولكن فعلياً، تعاني كلها الكلفة العالية. إن الكلفة المقبولة لاستخراج النفط المكثّف هي التحدي التقني الرئيس للصناعة النفطية.

لقد طُوّرت عدة تقانات في بداية الثمانينيات: تدفق البولمرات، مواد ذات فاعلية سطحية، حقن الـ CO_2، أو الغاز الطبيعي، وأنواع عديدة من المعالجات الميكروبية (الصندوق 9 و10)، وتتضمن كل هذه التقانات اقتصاديات ضعيفة، لذلك فقد أوقفت معظم البحوث في هذا المجال. إن السبب الجوهري للاقتصاديات الضعيفة هو ببساطة أن الكميات المطلوبة تكون كبيرة جداً لأن فراغ المسامات كلها بحاجة إلى ملئها بمواد استخراج النفط المكثّف. ويجب من أجل ذلك أن تكون منخفضة الكلفة جداً[(6)].

يُعدُّ كلٌّ من غاز الهيدروكربونات وCO_2 مادتين مهمتين لاستخراج النفط المكثّف. وبالاعتماد على ضغط احتياطي النفط ودرجة حرارته يتعذر مزج هذه الغازات بالنفط وتقوم إزاحة النفط في نمط الاستخراج الثانوي. ويمكن أن تكون قابلة للمزج، وفي هذه الحالة ستزداد حركة النفط وتحسّن الاستخراج أكثر من الممكن مع الاستخراج الثاني، بعملية يمكن تصنيفها كاستخراج ثلاثي.

الصندوق 9
الاستخراج المكثّف للنفط كيميائياً

(مواد ذات فاعلية سطحية، بولمرات. . . .)

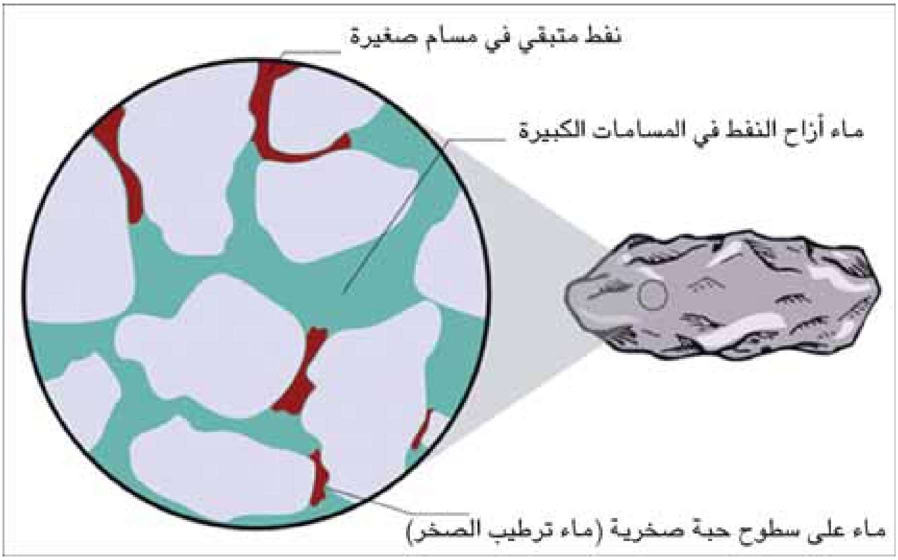
إن المواد ذات الفاعلية السطحية هي جزئيات تحتوي على جانب شرهٍ للماء («محب للماء») وجانب كَرِه الماء أو أليف للنفط («محب للنفط»).

(6) استخراج النفط المكثّف الحراري، أو تدفق البخار، لم تناقش في هذا الفصل. وفي سياق هذا الكتاب، تعتبر بشكل أكبر تقانة من أجل الإنتاج غير التقليدي، أكثر من تقانة استخراج النفط المكثّف التقليدية، ولذلك نوقشت في الفصل التالي.

وبذلك، فهي تتراكم على السطح البيني بين النفط والماء، تغير التوتر على السطح البيني بين الاثنين وتسمح لقطرات النفط الصغيرة أن تذوب في الماء. تستخدم مواد كهذه بكثرة في المنظفات ومستحضرات الصابون في مفهوم الاستخراج المكثّف للنفط، إذ يمكن إضافتها إلى الماء المحقون في احتياطي النفط إذ ستساعد في الحصول على نفط أكثر في الماء. وفي المصطلحات التقنية، عن طريق تغيير التوتر على السطح البيني، «تخفض تشبع النفط المتبقي». (الكمية من النفط التي لا يمكن دفعها إلى الخارج بالماء).

أما البولمرات فهي عبارة عن جزيئات أطول تضاف إلى الماء المحقون بتركيز بضع أعشار المئوية تستطيع أن تؤدي أدواراً عديدة. ويتوقف ذلك على طبيعة وخواص البولمر المستخدم. وتسهّل عملية الإزاحة المنتظمة للنفط بواسطة الماء عن طريق نقل اللزوجة العالية إلى الماء المحقون. ولها كذلك قابلية للتأثير في «قابلية الابتلال» (الترطيب) والتوتر على السطح البيني، وتتصرف بذلك بآلية شبيهة بآلية المواد ذات الفاعلية السطحية. وأخيراً، غالباً ما تتغير لزوجة البولمرات بدلالة حجم المسامات (تصرف «تخفيف الجز»)، وهذا يمكن أن يحسّن «التدفق المساحي» عن طريق تخفيف نزعة الماء للانسياب خلال المسارات ذات النفاذية العالية فقط. ويمكن استخدام مواد كيميائية أخرى للتأثير في قابلية الابتلال (الترطيب)، وبالتالي التأثير في استخراج النفط.

لقد أُجريت بحوث في تقانات استخراج النفط المكثّف الكيميائية بشدة في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات، غير أنه اكتشف أن هذه المواد غير اقتصادية في إطار أسعار النفط المنخفضة على مدار العشرين عام الماضية. وبقيت هذه التقانات فعّالة في بعض المشاريع الموجهة القليلة منذ ذلك الوقت، فيما كان التقدم التقني في هذا المجال بطيئاً جداً. وأما روسيا والصين فوحدهما الدولتان اللتان استمرتا باستخدام بولمرات متنوعة في استخراج النفط المكثّف إلى حد ملحوظ.



الشكل (2 ـ 15): النفط المتبقي المتروك في مسامات صغيرة بعد إزاحة الماء للنفط من المسامات الكبيرة (تعريف صوّري)

لقد استُخدم غاز CO_2 الممزوج في عملية الحقن كتقانة استخراج النفط المكثّف في تكساس لمدة عشرين سنة. وما جعل من المحتمل أن تكون هذه التقانة جذابة جداً في المستقبل هو أنه من الممكن أن يغيّر الاحتباس الحراري العالمي والحاجة لتخفيف انبعاث CO_2 في الجو ربما الاقتصاد عن طريق وضع كلفة «سلبية» على الـ CO_2، وذلك أنه يمكن أن تحصل شركات النفط على أجر لاستخدامها غاز الـ CO_2 الفائض خلال حسابها الضريبي أو تجارة الانبعاثات. وهذا مهم جداً بصورة محتملة. ولكن من المرجح أن تضع قضايا احتواء غاز الـ CO_2 ونقله قيوداً صارمة على التطبيق (الاستخدام). ومن المدهش أنه في المناطق حيث يوجد ضريبة كبيرة على غاز الـ CO_2، كما هو الحال في النرويج، فإنه لا توجد خطط نشطة لمشاريع استخراج النفط المكثّف باستخدام غاز الـ CO_2. قد اختتمت مراجعة حديثة لمديرية النفط النرويجية (Norway CO_2 2005) بتقويم متشائم لإمكانيات غاز الـ CO_2 في تقانة استخراج النفط المكثّف في ذلك البلد، وذلك لأن كلفته أقل فاعلية من التقانات البديلة[7].

---

(7) مع ذلك فالنرويج رائدة في احتواء وخزن الكربون من خلال مشروع سليبنر (Sleipner) إذ يقوم بضخ غاز الـ CO_2 في تركيبة الماء المحتوى، بدلاً من احتياطي الهيدروكربون.

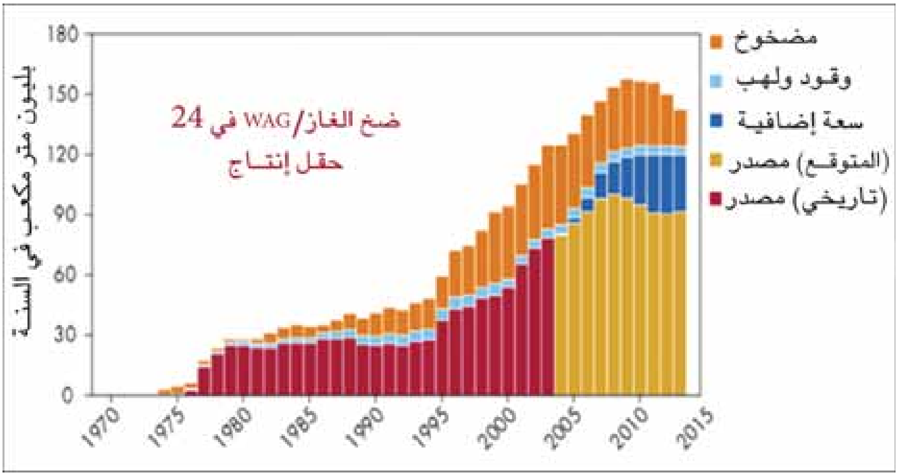
وفي الجانب البريطاني لبحر الشمال، أعلنت شركة بريتش بتروليوم مؤخراً عن مشروع موجّه إلى استخراج النفط المكثّف باستخدام غاز الـ CO_2 في حقل ميلر. وأما الولايات المتحدة التي تملك أعلى كثافة من حقول النفط المستنزفة ومصادر انبعاث غاز الـ CO_2 الهائلة، فإنها تبقى المنطقة التي يوجد فيها أضخم إمكانية لتقانات كهذه. وتوحي تجارب استخراج النفط المكثّف باستخدام غاز الـ CO_2 في الولايات المتحدة ومناطق أخرى أنه من الممكن زيادة استخراج النفط بين خمسة في المئة و15 في المئة. وخلصت الدراسة الحديثة التي أجرتها وزارة الطاقة في الولايات المتحدة أنه من الممكن أن تولد تقانة استخراج النفط المكثّف باستخدام غاز الـ CO_2 43 مليار برميل من النفط الاحتياطي الجديد في ست مناطق في الولايات المتحدة وحدها (DoE CO_2 2005).

كما أكدت منشورات وكالة الطاقة الدولية الأخرى (IEA, CCS-2004)، فإن السياسات العامة النشطة مطلوبة للتطبيقات العامة لاستخراج النفط المكثّف باستخدام غاز الـ CO_2 باستخدام انبعاثات غاز الـ CO_2 المصنوعة من قبل البشر في الحقيقة. ولا تعتبر تقانة استخراج النفط المكثّف باستخدام غاز الـ CO_2 اقتصادية إذا كانت أسعار غاز الـ CO_2 المنقول إلى موقع البئر تزيد على قيمة تتراوح بين 10 دولار/ طن و20 دولار/ طن (بالطبع، هذا التقويم يختلف ويعتمد على احتياطي النفط). مثلاً، إذا كانت كلفة احتواء غاز الـ CO_2 ـ اعتباراً من منشأة طاقة ـ وإحضاره إلى موقع بئر وصلت إلى 50 دولار/ طن، فإننا نحتاج إلى ائتمان أو حافز كربون لتغطية الفرق. من جهة أخرى، يمكن النظر كذلك إلى تقانة استخراج النفط المكثّف كوسيلة لتخفيف كلفة احتواء غاز الـ CO_2 وتخزينه.

يمكن أن تكون تقانة استخراج النفط المكثّف باستخدام الغاز الهيدروكربوني مثيرة للاهتمام أيضاً عندما يكون الغاز متوفراً في نفس الحقول أو قريباً منها، وعندما لا توجد بنية تحتية لنقله إلى السوق. في حالة كهذه يكون الإنتاج ذا قيمة صفرية، ومن المرجح أن يُحرق ببساطة[(8)]، الأمر الذي سينتج منه انبعاثات كبيرة من غاز الـ CO_2. وتُستخدم برامج استخراج النفط المكثّف بحقن غاز الهيدروكربون في أماكن عديدة حول العالم، ما يزيد استخراج النفط بين خمسة في المئة وعشرة في المئة. ومع ذلك، فإنها عادة ما

(8) انظر صندوق 6 من أجل مناقشة كاملة للغاز المحترق والوسائل المختلفة لتخفيضه.

تكون اقتصادية فقط عندما لا تتوفر سوق للغاز[9]. ويمكن دمجها بالماء المحقون، إما من خلال حقن غاز وماء بديل (water and gas WAG) أو من خلال حقن متزامن، كخليط ماء/ غاز أو على شكل رغوة. ويوضح الشكل 16,2 ازدياد استخدام الغاز في عمليات الحقن في الحقول النرويجية. وقد جرى وصف تقانة استخراج النفط المكثّف ميكروبياً (microbial enhanced oil recovery MEOR) في الصندوق 10. ومن المحتمل أن يكون هذا هو المجال الذي لاتزال تجري في صدده معظم البحوث، وقد اعتمدت بشكل كبير على افتراض أن البيولوجيا علم سريع التطور وأن مفاجآت سارة لابدّ ستظهر. سنحتاج بالتأكيد إلى كثير من التحقيق العلمي بعيد الأمد حول علم البيئة للأنظمة الميكروبية الجيولوجية العميقة. ولكن لا يمكن دعم تحقيقات كهذه إلا بأنظمة البحوث الحكومية. وفي مقدور التقدم المفاجئ في تقانة استخراج النفط المكثّف الميكروبية زيادة الاستخراج العالمي بخمسة في المئة.



الشكل (2 ـ 16) : التوجه في حقن غاز الهيدروكربون من أجل استخراج مكثّف للنفط في النرويج

تزداد كمية الغاز المحقون (باللون برتقالي) في مطلق الأحوال وبالعلاقة لإجمالي كمية الغاز المنتج في النرويج.
تقدمة : مديرية النفط النرويجية.

---

(9) يمكن استخراج معظم الغاز المحقون في نهاية طور الإنتاج. وهذا ذو قيمة منخفضة إذا حاولنا زيادة القيمة الحالية الصافية إلى الحد الأقصى مع معدل تخفيض مهم، غير أنه من الممكن أن تكون جذابة أكثر لدول تحاول تعديل الاستخراج طويل الأمد.

الصندوق 10

استخراج النفط المكثّف ميكروبياً

اعتمدت وسائل عديدة لاستخراج النفط المكثّف ميكروبياً. إن إحدى الإمكانيات محاولة تحفيز نشاط العضويات بطريقة طبيعية في الاحتياطيات النفطية عن طريق تغذيتها بالأغذية المناسبة من خلال حقن الآبار. وهناك أسلوب آخر يتمثل بحقن عضويات مناسبة تستوطن احتياطي النفط، وتُدعم إما بحقن مغذيات أو بتأييض الهيدروكربونات الموجودة في المكان. ويؤمل أن تكون المنتوجات الأيضية للنشاط الميكروبي ـ التي تكون عادة بولمرات حيوية، مواد حيوية ذات فاعلية سطحية وغاز ـ قادرة على العمل من أجل تحسين حركية النفط. وتتضمن احتمالية أخرى عضويات ذات نشاط طبيعي يؤثر في الهيدروكربونات بإفسادها، وهكذا تقلّل من لزوجتها وتجعلها قادرة على التدفق بسهولة أكثر. ولكن معظم البكتيريا تفضل أن تقوم بتأييض الهيدروكربونات الخفيفة بالتأثير المعاكس.

مبدئياً، باستثمار إمكانية تكاثر العضويات في المكان، يمكن لتقانة استخراج النفط المكثّف ميكروبياً أن تتجاوز مشاكل تقانات لاستخراج النفط المكثّف الأخرى المتعلقة بكميات الحقن الكبيرة المطلوبة. وعلى الرغم أنه جرى الإبلاغ عن بعض التأثيرات الإيجابية، إلا أن التحدي الأكبر يبقى في ضبط الآلية. وفي الحقيقة، يمكن استخدام التقانات الميكروبية أيضاً لسد مناطق نطاقات مختارة في احتياطي النفط، محسّنة بذلك إزاحة المناطق المتبقية بواسطة حقن الماء. وتُعرف هذه المعالجة بـ «ضبط التثبيت». ومن الممكن استخدام البولمرات المصنعة من قبل البشر من أجل هذا الهدف. ويوضح تطبيق هذا النوع التأثيرات السلبية التي يمكن أن تظهر حتى يجري تفهم موضوع تطور المستوطنات البكتيرية في الاحتياطيات النفطية.

عمليات الاستخراج في الاحتياطيات الكربوناتية

من الضروري قول ما يأتي في ما يتعلق باحتياطيات الكربونات. يعرض السيناريو المرجعي لدورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** عام 2004 زيادة ضخمة في إنتاج النفط في الشرق الأوسط من 20 مليون برميل يومياً عام 2002 إلى 50 مليون برميل يومياً عام 2030. وتسيطر الاحتياطيات الكربونية في المنطقة، إذ

يوجد نصف الاحتياطي العالمي المؤكد في احتياطيات كربونية كهذه حيث يكون التنبؤ بأداء إنتاجها أكثر صعوبة من الاحتياطيات التي تسيطر فيها المعادن معادن سليكاتية. يوجد في العادة سببان لذلك. **الأول**، إن صخور احتياطي النفط الكربونية (الكلسية) مختلفة بشكل خاص وتحتوي على مقوِّمات صغيرة من الصعب اكتشافها بالقياسات الزلزالية أو القياسات الأخرى، كما في حالة التشققات، أو «الأبري» (مقوّمات جيولوجية رقيقة غير نفاذة) التي تؤثر في بعض الأحيان على حركة السوائل بشكل كبير في احتياطي النفط. **الثاني**، تميل الصخور إلى أن تكون «مرطَّبة بالنفط». وهذا يعني أن النفط يميل إلى الالتصاق بالصخور بشكل أفضل من الماء، وبذلك يقلّ الاستخراج بحقن الماء. وسيكون من المطلوب في هذه الحالة، على الأرجح، وجود تطور مهم في فهم وإدارة احتياطيات كهذه إذا كانت منطقة الشرق الأوسط ستقوم بالإنتاج الزائد الكبير الذي يتوقعه السيناريو المرجعي لـ IEA.

سيكون المفتاح لتطوير التقانات المطلوبة للقدرة الإنتاجية للصناعة بشراكات أساسية وثيقة بين المالكين الرئيسين للاحتياطيات الكلسية (الكربوناتية) (بشكل أساسي الشركات الحكومية في الشرق الأوسط) ومزوّدي التقانة (الموجودين في دول الـ IEA بشكل أساسي).

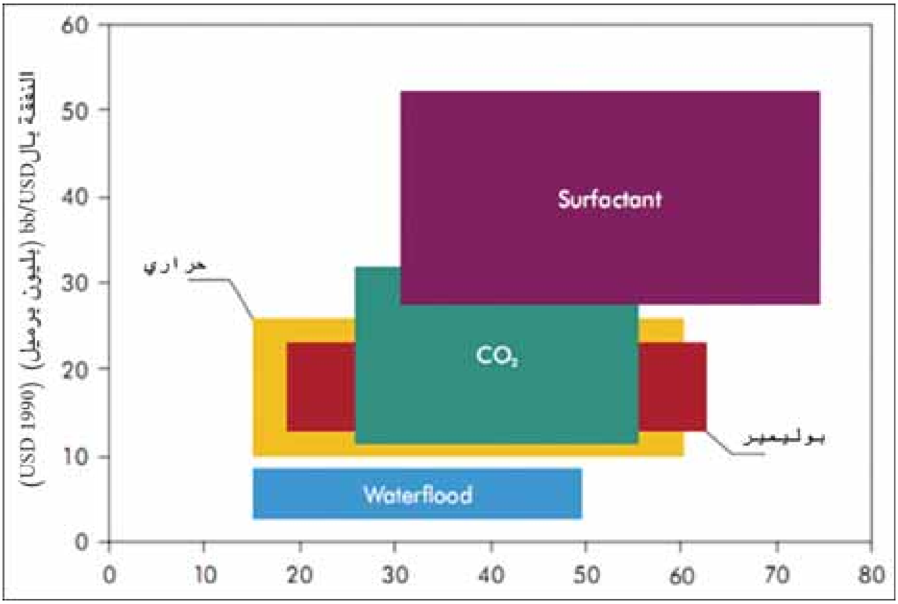
ملخص عن الاستخراج المكثّف للنفط

كما رأينا، تم تطوير العديد من تقانات الاستخراج المكثّف للنفط في بداية الثمانينيات. غير أن المزيد من تطورها أوقف خلال الأدوار المتتابعة لانخفاض أسعار النفط. لذا يمكن التخمين بما يخص هذا الأمر أنها ستصبح اقتصادية مرة أخرى. فقد بلغت أسعار النفط ذروتها في عام 1982 بحوالى 65 دولاراً للبرميل[10]، وهو سعر اعتُبر صحيحاً لجعل الاستخراج المكثّف للنفط اقتصادياً. وبافتراض أن التطور التقاني مقبول منذ عام 1982، فمن الممكن توقع أن يتوهج الاهتمام مرة ثانية في أسعار نفط مستدامة تبلغ تقريباً 40 دولاراً للبرميل. ويشير الشكل التخطيطي في الشكل 17,2 الذي نشرته شركة شلمبرغر عام 1992 استناداً إلى عمل معهد النفط الفرنسي إلى إمكانية مهمة لتقانة الاستخراج المكثّف للنفط بسعر 30 دولاراً للبرميل في العام 1990 (مكافئ برميل نفطي لـ 43 دولاراً من أجل ضبط التضخم). وأفيد مؤخراً، (مجلة **النفط والغاز**، آذار/مارس 2005)، أن

(10) هذه الذروة في متوسط السعر في العام، كان السعر فعلياً أعلى خلال فترة قصيرة بين 1980 أو 1982.

شركة كانو للنفط (www.canopetro.com) سترفع كلفة البرميل من دولارين أميركيين إلى أربعة دولارات أميركية للبرميل، وكلفة كاملة بين 12 دولاراً و25 دولاراً للبرميل لمشاريعها المخططة في أوكلاهوما وتكساس. وتستند هذه الأرقام إلى عملية حقن البولمر ـ مواد ذات فاعلية سطحية ـ وقلويات يحقن فيه محلول من هيدروكسيد الصوديوم، ومواد ذات فاعلية سطحية، وبولمرات، مع استخراج إضافي مزعوم من 20 في المئة إلى 30 في المئة من النفط الأصلي الموجود في الحقول القديمة. ومع ذلك، فإن هذه معالجة دقيقة تبقى بانتظار برهنتها التامة.

ستستدعي تخفيضات أكثر للكلفة إجراء بحوث جوهرية جديدة على السطوح البينية بين السوائل والصخور وكيف يمكن لها أن تتأثر بواسطة كميات صغيرة من المضافات. إننا بحاجة إلى بحث كهذا ليكون له تأثير بحلول عام 2030.



الشكل (2 ـ 17): الكلفة المتوقعة لمختلف طرائق الاستخراج المكثّف للنفط بالدولار الأميركي عام 1990 لكل برميل

تقدمة: شركة شلمبرغر.

كما نوقش في بداية هذا الفصل، يفترض تقويم هيئة المسح الجيولوجي للموارد القابلة للاستخراج بعض الاستخراج المكثّف للنفط، غير أن ذلك لا يشتمل على الإطلاق كل الإمكانيات للتقانات المناقشة سابقاً. وتضيف خمسة في

المئة لزيادة معدل الاستخراج المحافظ للنفط الموجود، في الأقل، 300 مليار برميل من النفط القابل للاستخراج إلى أرقام هيئة المسح الجيولوجي. وفي الحقيقة، فإن بعض الكتّاب مثل (Rogner, 1997; Rogner, 2000) يقدّر هذه الكمية بـ 600 مليار برميل. ويجب أن يتّبع توزع جغرافي لإضافات نفط كهذه النفط الأصلي الموجود. ولذلك يبدو الأمر شبيهاً بتوزع الاحتياطي المؤكد (انظر الشكل 1 ـ 10 في الفصل الأول)، مع أنه ربما توجد كمية أكبر من ذلك بقليل في الولايات المتحدة (بإمكانية قد تصل، في الأقل، إلى 50 مليار برميل إضافي).

الصندوق 11
تقويم موارد هيئة المسح الجيولوجي الأميركية، نمو الاحتياطي والاستخراج المكثّف للنفط

تنبع معظم التقويمات المستخدمة بشكل واسع في موارد الهيدروكربون في العالم من تقويم النفط العالمي لعام 2000 من تقويمات هيئة المسح الجيولوجي الأميركية. وبمقارنة هذه التقويمات بالدراسات الأخرى، فإن جدارتها الرئيسة تنبع من توفرها للعموم ووصفها المفصل لطرائقها. وقد بدأ التقويم بقائمة «لأنظمة النفط»، أو المناطق الجيولوجية حول العالم ذات القابلية التي تحتوي على هيدروكربون. وقد شمل تقويم الموارد لكل واحدة منها على ثلاثة أجزاء: احتياطي مؤكد، وموارد غير مكتشفة، و«نمو الاحتياطيات».

يجري اعتبار الاحتياطي المؤكد من معلومات منشورة أو من لجنة جيولوجيين خبيرين بالمنطقة. وتقوّم لجنة جيولوجية الموارد غير المكتشفة تحدد الاحتمالات العديدة آخذة بعين الاعتبار ظهور، أو حجم، أو عمق، أو عامل الاستخراج.

يقوّم نمو الاحتياطي كعامل مضاعف للاحتياطي المؤكد. ويعتمد ذلك على وقت اكتشاف احتياطي النفط. والفكرة هي أن يجري اعتبار حقيقة أن الاحتياطي المؤكد (زائد الإنتاج المتراكم) في احتياطي النفط محدد يميل للزيادة مع مرور الزمن. وهناك عدة أسباب لذلك، إذ إن بإمكان التقويم الأولي أن يكون محافظاً، أو من الممكن أن يُظهر الحفر الإضافي في احتياطي النفط أو بالقرب منه احتياطياً إضافياً، أو أن تصبح الموارد المعروفة في احتياطي النفط التي كانت أساساً قابلة للاستخراج تقنياً، ولكن غير اقتصادية، موارد

اقتصادية ـ وبذلك مؤكدة ـ نتيجة للتطور التقاني أو تغيرات في الافتراضات الاقتصادية (مثلاً، تطور البنية التحتية لإنتاج احتياطي المؤكد. أما موارد أخرى فيمكن أن «تحمل على الظهر» اقتصادياً في استثمارات سابقة). مرة أخرى، يمكن للتطورات التقانية والتجارب البسيطة أن تأتي بمردود أعلى من المردود المخطط له أصلاً. وقد اشتقت هيئة المسح الجيولوجي الأميركية عاملَ نموٍّ احتياطٍ تاريخي متوسطٍ من قاعدة بيانات لحقول أميركية (موضحة في الشكل 2 ـ 18) وطبقته على كل الحقول في العالم. وطبقت هيئة المسح الجيولوجي الأميركية العملية على حقول غير مكتشفة باعتبار تاريخ الاكتشاف المفترض (إحصائياً). وقد قيّم الجيولوجيون كميات هذه الآبارعن طريق مماثلة احتياطيات مؤكدة في احتياطيات معروفة.

تفترض هذه الآلية بوضوح بعضاً من تقانة الاستخراج المكثّف للنفط، وبما إن الاستخراج المكثّف للنفط افترض في أشكال الاحتياطات المؤكدة، وكذلك بسبب منحني نمو الاحتياطي المحدد بناءً على بيانات الولايات المتحدة التي تتضمن كمية الاستخراج المكثّف للنفط المقدمة تاريخياً في تلك الدولة. ومع ذلك فإن التقويم لا يأخذ في الحسبان أي مساهمة من تقانات الاستخراج المكثّف للنفط ليست جزءاً من الممارسات التاريخية العادية، أو من الاستخدام الأعظم لتقانة الاستخراج المكثّف للنفط المتبعة حالياً. إن معدل الاستخراج المعني ليس محدداً بشكل واضح، غير أنه في الأغلب أعلى بقليل من المعدل التاريخي للولايات المتحدة. في الحقيقة، يشبه استخدام مؤلفين آخرين (Rogner, 1997; Rogner, 2000; Greene, 2003) أرقام هيئة المسح الجيولوجي الأميركية مفترضين أنها تنسجم مع استخراج 40 في المئة، وأن هذا الاستخراج العالي ينتج موارد إضافية.

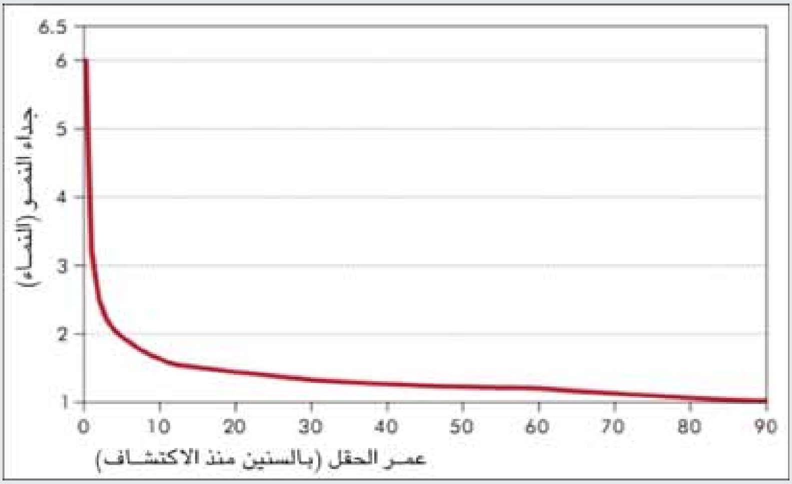
بالنسبة إلى هذا الكتاب، الذي استند إلى مدخلات خبراء الصناعة، فإن تقويمنا هو 300 مليار برميل (حوالى خمسة في المئة من مجمل النفط التقليدي الموجود) لاستخراج مكثّف محتمل للنفط أكثر مما تتضمنته تقويمات هيئة المسح الجيولوجي الأميركية.

يجب ملاحظة أن بعض المؤلفين يجادلون بأن ظاهرة «نمو الاحتياط» خطأ تقديري من التقارير المحافظة جداً للولايات المتحدة عن الاحتياطي المؤكد، يجب عدم تطبيقها على العالم، وبخاصة في دول الأبك حيث ادّعى

بعض المراقبين أن أرقام الاحتياطي المؤكد المنشورة مشكوك فيها (Simmons, 2005). ومع ذلك، أشارت دراسات معمقة لجيولوجيين من هيئة المسح الجيولوجي الأميركية إلى نمو احتياط ملاحظ أيضاً في حقول كبيرة خارج الولايات المتحدة، بمعدل ثابت بافتراض التقويم عام 2000 (Klett, 2003).

ويجب كذلك ملاحظة أنه باعتبارنا نستخدم معلومات هيئة المسح الجيولوجي الأميركية في هذا الكتاب، تذكر هيئة المسح الجيولوجي الأميركية فعلياً توزعات احتمالية لظهور كميات مختلفة من الموارد. وقد استخدم في هذا الكتاب القيم الوسطى لهيئة المسح الجيولوجي الأميركية.

يمكن للمتشائمين الإشارة إلى أن استخدام معدل منخفض من تقويمات هيئة المسح الجيولوجي الأميركية ستعطي صورة أقل تفاؤلاً للنفط التقليدي الباقي. وأخيراً، أضفنا معاً التقويمات الوسطى للنفط لكلّ من هيئة المسح الجيولوجي الأميركية والـ NGL، وصُححت التقويمات المتوسطة لموارد السائل والغاز لتأخذ بالحسبان الإنتاج وتغيرات الاحتياطي منذ 1996. وبما إننا مهتمون هنا فقط بالمقاييس الكبرى التي يمكن أن يكون لها تأثير مهم في تطور التقانة المستقبلية وموارد الإمدادات، فإن هذا الإجراء، على الرغم من أنه غير صحيح إحصائياً، فإنه كافٍ لهدف كهذا. ويبين هذا أيضاً لماذا حوّلت كل الأرقام إلى أرقام ذات رقمين مهمين فقط.



الشكل (2 ـ 18): دالة النمو الاحتياطي لهيئة المسح الجيولوجي الأميركية

أعيد إنتاجها من USGS.

الصندوق 12

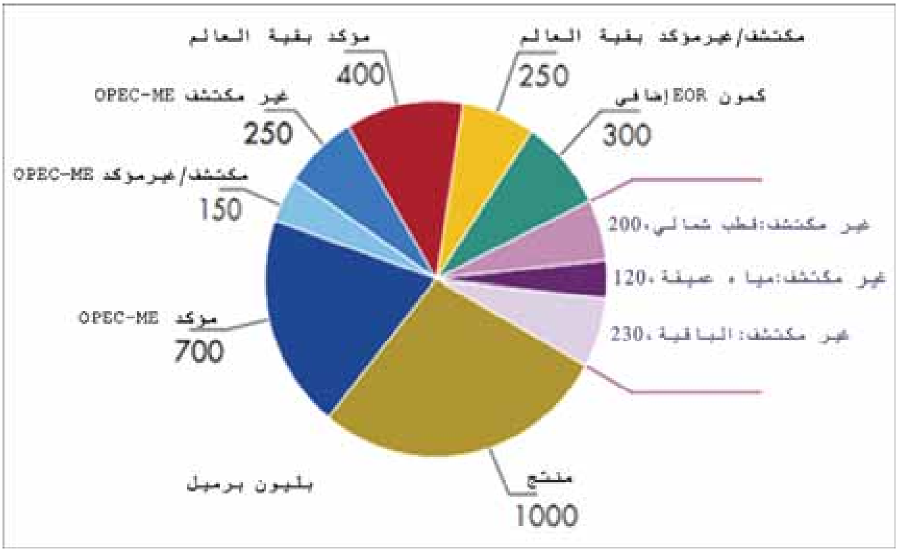
اتفاقية IEA المطبقة على الاستخراج المكثّف للنفط

كجزء من ميثاقها لرعاية سلامة تزويد الطاقة لدولها الأعضاء، يؤمن مكتب تقانة الطاقة في الـ IEA شبكة من التعاون الدولي لتقانات الطاقة، بما في ذلك إطار قانوني لبرامج الطاقة «لاتفاقية الـ IEA المطبقة». ويجمع بعض العلماء والخبراء من حكومات أعضاء في الـ IEA (كذلك حكومات دول غير أعضاء ورعاة صناعيون) يرغبون في المشاركة بتبادل المعلومات، الموارد والنتائج حول أمور محدّدة. وتتراوح النشاطات من تعاون، وتحليل، ونشر معلومات، وبحث وتطوير إلى توحيد الجهود التقنية المبذولة.

تجمع اتفاقية الـ IEA لاستخراج النفط المكثّف، التي وقّعت عام 1979، مجموعة من 12 دولة (أستراليا، النمسا، كندا، الصين، الدانمارك، فرنسا، اليابان، النرويج، روسيا، المملكة المتحدة، الولايات المتحدة، فنزويلا) بهدف تقدير ونشر نتائج البحث والتطوير في مجال تقانة استخراج النفط المكثّف، والتجارب، والمختبرات، والتجارب الميدانية. وقد ركّز برنامج العمل بشكل كبير على دراسات البحث والمختبرات الأساسية التي تتضمن دراسات السوائل والسطوح البينية في الأوساط المسامية، وبحوث على المواد الفاعلة في السطوح والبولمرات، وتقنيات تدفق الغاز والاستخراج الحراري. وتنظم ورشات عمل وندوات كل سنة لتأكيد نشر النتائج.

موارد تقليدية جديدة: مياه عميقة، القطب الشمالي، الاحتياطيات العميقة

من المرجح أن تكون معظم الحقول الجديدة التي ستكتشف في الـ 25 سنة القادمة في حالات «صارمة». ويعتقد أن حوالى خُمس النفط التقليدي غير المكتشف خارج الشرق الوسط سيكون قبالة السواحل في مناطق عميقة، وأما الثلث الآخر فسيكون في المناطق القطبية، كما هو موضّح في الشكل 2 ـ 19. وهذا هو سبب الاهتمام القوي للصناعة في هاتين «المنطقتين الحدودية».



الشكل (2 ـ 19): النفط التقليدي القابل للاستخراج عالمياً بشكل نهائي (كما في الشكل 2 ـ 3) مع انقطاع في النفط غير المكتشف، وإضافة إمكانية استخراج النفط المكثّف

بنيت على بيانات USGS والتحاليل من IEA.

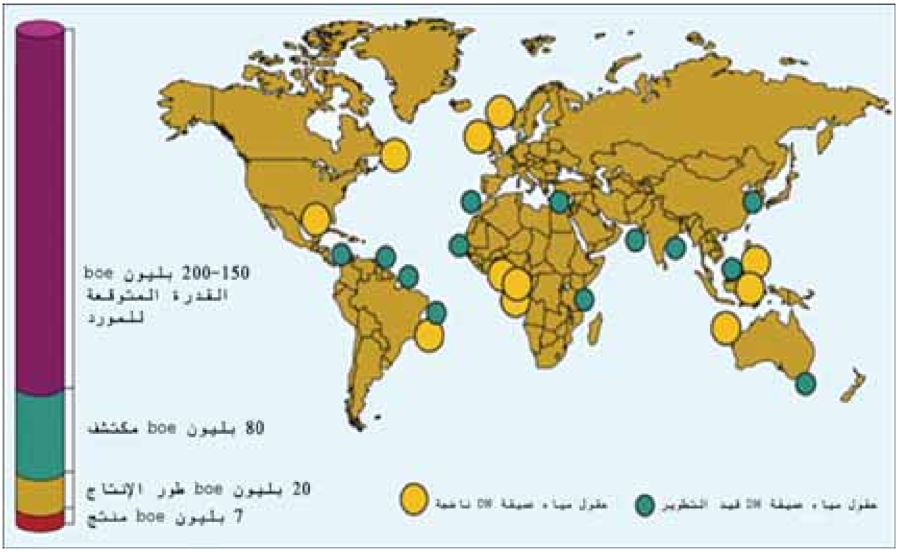
المياه العميقة

تشير «المياه العميقة» إلى حقول حددت قبالة السواحل في أعماق بحرية كبيرة. ولا يوجد تحديد واضح للمدى الذي تعتبر فيه المياه عميقة. أساساً، تُعتبر التقانات الممارسة بشكل روتيني، في أي وقت كان، تقانات بحرية تقليدية، بينما تعد التقانات الحديثة التي توسع قابلية الإنتاج الصناعي مياهاً عميقةً. ويُستخدم أحياناً مصطلح «مياه عميقة جداً» لوصف أعماق المياه التي يجري فيها التنقيب الحالي، غير أن تقانة الإنتاج المتوفرة تُعتبر ملائمة فقط.

لقد طُوّرت الآن حقول في أعماق مياه تبلغ حوالى 2000 متر في خليج المكسيك في الولايات المتحدة قبالة الساحل غرب أفريقيا وقبالة ساحل

البرازيل. إن الرقم القياسي العالمي الحالي عملياً هو حوالى 3000 متر. وتفرض عمليات المياه العميقة تحديات رئيسة تقانية وهندسية تتضمن كلفة عالية جداً تتوفر للاحتياطيات المنتجة جداً فقط. غير أن للمياه العميقة إمكانية توفير موارد مهمة جداً (الشكل 2 ـ 20).

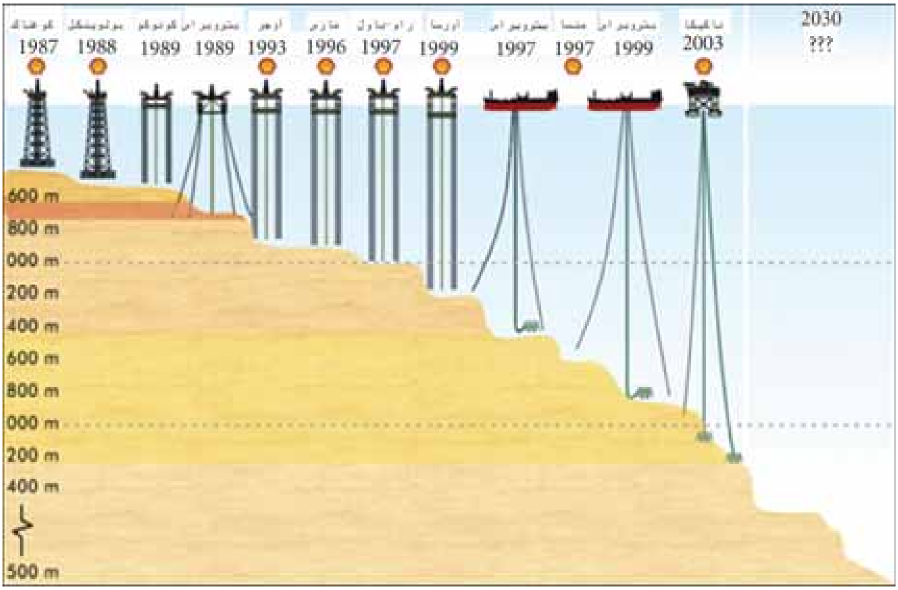
إن سجل مسار الصناعة في دفع التقانة إلى حدودها القصوى لتسهيل الوصول إلى موارد مياه عميقة ليس ضرباً من الخيال (الشكل 2 ـ 21). ومن الممكن توقع استمرار هذا المنحى، ما يمكننا من الوصول حتى إلى مياه أكثر عمقاً وأكثر أهمية، ما يخفّض كلفة الحفر والإنتاج ضمن الحدود الحالية. لقد خُمّن أن 40 في المئة من موارد المياه العميقة غير المكتشفة موجودة في مياه عمقها بين 2000 و3000 متر، وأن 30 في المئة من هذه الموارد يقع على عمق بين 3000 و4000 متر. وأما على عمق أكثر من 4000 متر فمن غير المرجح وجود احتياطيات هيدروكربونة إضافية فيها.



الشكل (2 ـ 20) : الإمكانية المستقبلية للنفط والغاز في المياه العميقة في العالم

تقدمـة : شركة شل.

المصدر : Wood Mackenzie .



الشكل (2 ـ 21): تطور تقانة المياه العميقة

تقدمـة: شركة شل.

بالمستطاع توقّع أن تكون الأوضاع في الأجزاء الأخرى من العالم نسخة عن ساحل خليج الولايات المتحدة حيث التراكمات الصغيرة ضمن حدود البارحة أصبحت اقتصادية فيما ابتعدت حدود المياه العميقة أكثر عن الساحل، إذ تبرر أكبر الاكتشافات في المياه العميقة تطور البنية التحتية التي يمكن تحميل الحقول الصغيرة عليها. وهذا مثال آخر يرجح فيه للصناعة أن تستمر في التجديد. وتفترض التقديرات في معظم الحالات تجديداً كهذا عندما تبقى منحنيات الانحدار متماشية مع المنحنيات التي سجلت في الماضي.

لقد ساهمت عدة ابتكارات في التقانات لجعلها قادرة على تلبية المتطلبات، وسيستمر مثل هذا التطور. وندرج هنا أمثلة عن التقانات الواعدة المعتبرة من قبل الصناعة:

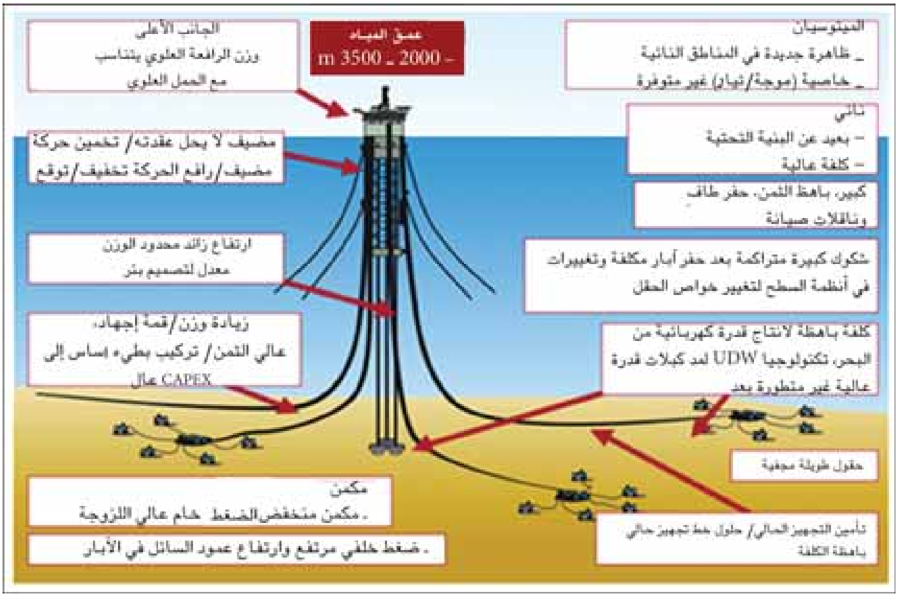
- اجتناب مشكلة الحفر المحسّن؛ إذ إن كل بئر تكون مكلفة جداً، وإن أي خطأ يمكن أن يكون مكلفاً جداً.
- الضبط المحسن لثبات حفر البئر؛ إذ إن الرَسوبيّات قرب قاع البحر عادة

ما تكون متماسكة بشكل سيّئ، ومعرّضة لعدم الثبات خلال الحفر.

- الحفر السريع لتخفيف الكلفة اليومية العالية لمنصات الحفر.
- تقانة من الطين إلى الإسمنت، وهي «حلقة مقدسة» لاستخدام سائل الحفر لإلصاق التغليف على حفرة البئر، وبذلك نلغي عدة خطوات من آلية بناء البئر.
- التغليف خلال الحفر والآبار أحادية الحفرة، الموصوفة سابقاً، في هذا الفصل تحت عنوان «مناطق أخرى».

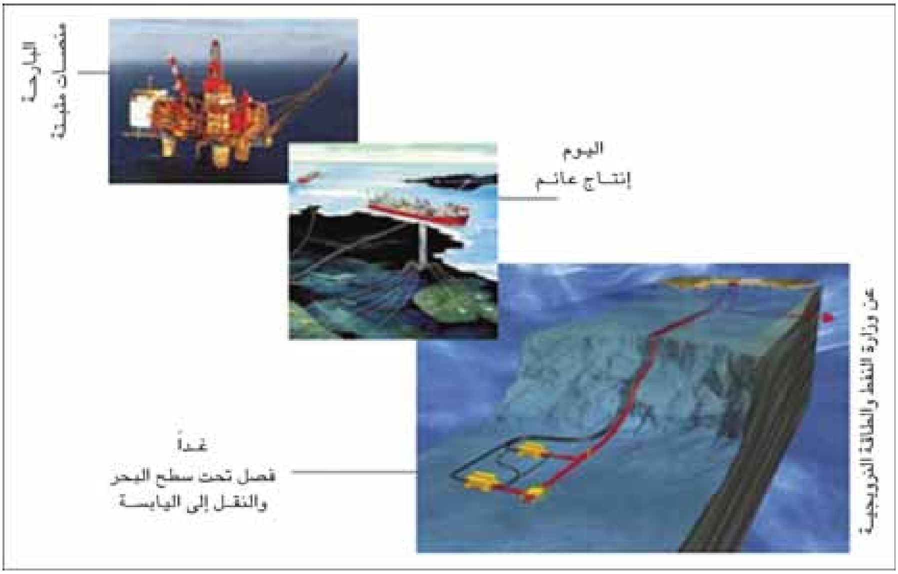
إن للآبار أحادية الحفرة، بشكل خاص، إمكانية السماح بالحفر في المياه العميقة بأجهزة حفر قديمة صمّمت أساساً للمياه الضحلة، وهكذا تسمح بإعادة استخدام منصات الجيل السابق، وتوفر نفقات مهمة جداً. كما أُخذ بعين الاعتبار كذلك الحفر في قاع البحر، غير أنه يبدو غير قادر على تحقيق منافسة مع منصات الحفر التقليدية في هذه المرحلة. وكما هو موضح في الشكل (2 ـ 22) فلا توجد تقانة واحدة تحتوي على «رصاصة سحرية» للانتقال إلى المياه العميقة. فهي أشبه ما تكون بحل سلسلة كبيرة من المشاكل في آن واحد.

ربما ستشهد التحسينات المفاجئة الأكثر تقدماً في التقانة تحت البحرية. تطورت الطرائق هنا من استخدام منصات إنتاج واسعة جداً تأخذ السوائل من الآبار وتعالجها للنقل، إلى منظومة من منشآت قاع البحر الصغيرة تحضر السوائل الخام إلى أماكن حيث يمكن معالجتها بكلفة مقبولة. وقد وُضّح هذا التطور في الشكل (2 ـ 23). وتتطلب المنشآت الآن «تخطيطاً مدينياً لتحت قاع البحر» مهماً لكي تستطيع الحد من التأثير البيئي، وتمكّن حقول صغيرة أن تتطور بكلفة مقبولة. وتنصب تجهيزات قاع البحر وتصان باستخدام روبوتات صغيرة غاطسة يُتحكم بها عن بعد. وقد ساهم تطور رئيس آخر للعلوم في هذا التقدم هو قابلية نقل خلائط من السوائل متعددة الأطوار (نفط، ماء، غاز، وفي بعض الأحيان رَوْبات صلبة) لمسافات متزايدة بواسطة خطوط الأنابيب. وقد اشتركت عدة دول أعضاء في الـ IEA في بحث تعاوني في أمور كهذه من خلال اتفاقية الـ IEA المطبقة حول علوم التدفق متعدد الأطوار (الصندوق 13).



الشكل (2 ـ 22) : التحديات التقانية الأساسية للمياه العميقة والعميقة جداً

تقدمـة : شركة شل.



الشكل (2 ـ 23) : تطور عمليات المياه العميقة، من المنشآت السطحية الكبيرة إلى تقانات تحت قاع البحر

تقدمـة : وزارة النفط والطاقة النرويجية.

الصندوق 13
اتفاقية الـ IEA المطبقة حول علوم التدفق متعدد الأطوار

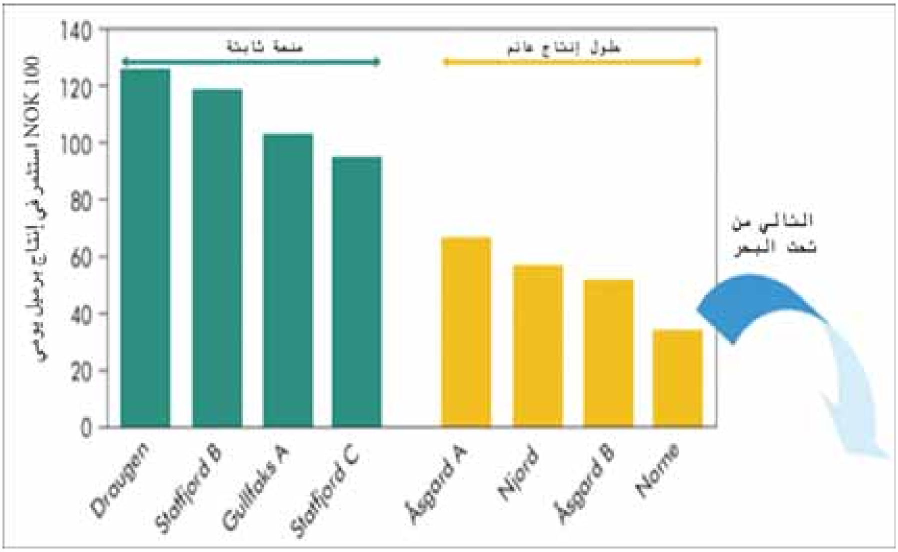
عادة ما تكون مخرجات بئر نفط أو بئر غاز خلائط متعددة الأطوار تحتوي على نفط سائل، وغاز هيدروكربون، وماء، وفي بعض الأحيان مواد صلبة. تقليدياً، تكون العناصر المختلفة مفصولة قرب جانب البئر وينقل دفق كل طور بشكل منفصل إلى المكان المطلوب (معالجة أكثر).

غالباً ما تكون هذه الوسيلة التقليدية في تقانة ما تحت قاع البحر غير اقتصادية، إذ إن ذلك سيعني وضع أجهزة الفصل ومختلف خطوط النقل في قاع البحر، وهي محاولة مكلفة جداً. غير أننا إذا تمكنا من نقل الدفق متعدد الأطوار بشكل مباشر إلى مسافات طويلة في خط واحد من أجل المعالجة على الشاطئ أو على منصة إنتاج البعيدة. ومع ذلك، فإن هذا صعب لأن انخفاض الضغط في التدفق متعدد الأطوار كبير جداً ولا تعمل المضخات التقليدية بشكل كاف على تدفق كهذا.

يوجد توجه آخر نحو «الفصل في البئر وإعادة الحقن» تشمل محاولة فصل الأطوار المختلفة في أسفل البئر نفسها، ومن ثم التخلص من المواد غير المرغوب فيها كالماء الناتج عند حقنها في التشكيلات الجيولوجية العميقة من دون إخراجها إلى السطح.

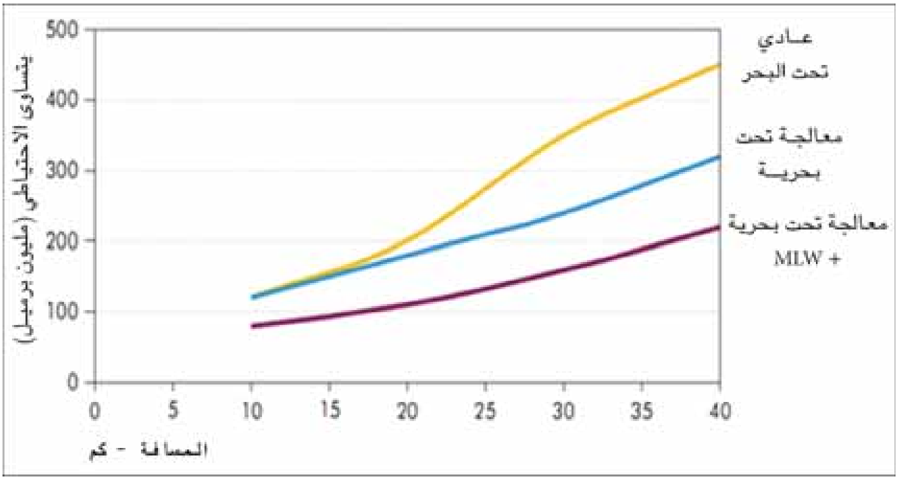
تتطلب كل هذه التقانات فهماً أكثر للتعقيدات الفيزيائية للتدفق متعدد الأطوار. وفي الحقيقة يظهر التدفق متعدد الأطوار في عدد كبير من العمليات في قطاع الطاقة، وبشكل ملحوظ في نقل الفحم الصلب أو الفحم المطحون، وفي الحرق في المراجل أو المحركات وفي الماء/ تبريد البخار في المراجل. وقد شجّع الاهتمام في كل هذه القضايا في عام 1987 على إجاز اتفاقية الـ IEA المطبّقة حول علوم التدفق متعدد الأطوار. وتشمل الاتفاقية ست دول (أستراليا، وكندا، والمكسيك، والنرويج، والمملكة المتحدة، والولايات المتحدة) تجمع مواردها في صندوق مشترك وتتشارك في معارفها حول التقانات القادمة.

إلا أن هناك حاجة إلى تقانة أكثر تطوراً لجعل مشاريع المياه العميقة مشاريع اقتصادية. وحالياً، لم تُعتبر30 مليار برميل من الـ 80 مليار مكافئ برميل نفطي (كلاهما من النفط والغاز) المكتشفة في مياه عميقة إلى الآن اقتصادية (بأسعار النفط على المدى الطويل تبلغ 25 دولاراً للبرميل). إن الدور الذي تؤديه التقانة مهم للغاية، كما هو موضح في الشكل 2 ـ 24 وفي الشكل 2 ـ 25. ومع التقدم المستمر على مدى الـ 25 سنة القادمة، يجب أن تصبح كل موارد المياه العميقة اقتصادية بأسعار نفط على المدى الطويل تتراوح بين 20 و35 دولاراً للبرميل.



الشكل (2 ـ 24) : تأثير كلفة تطور التقانة بعيداً عن الشاطىء في القطاع النرويجي لبحر الشمال

ملاحظة: إن NOK= 0.16 وضعت الحقول التي طُوِّرت أولاً إلى اليسار والحقول التي طورت لاحقاً إلى اليمين، وهي تغطي الفترة من عام 1980 إلى عام 2000.



الشكل (2 ـ 25): أثر التقانة في جعل التراكمات الهيدروكربونية أصغر وأبعد عن المنصات الموجودة بشكل اقتصادي

يظهر المثال هنا في المياه العميقة قبالة ساحل أنغولا أنه، بالنسبة إلى تقانة ما، كلما أصبح الحقل الجديد بعيداً عن التجهيزات الموجودة ازداد الطلب على كمية أكبر من الاحتياطي لتبرير الاستثمار ذي الصلة بالتجهيزات (مثال، منحني تحت بحري تقليدي). الأجيال الجديدة المتتالية للتقانات (مثال، معالجة تحت بحرية، ثم معالجة تحت بحرية وآبار متعددة الجوانب) تخفض المنحني، مما يمكّن الحقول الصغيرة من التطور اقتصادياً.

تقدمة: شركة هايدرو نورسك.

هناك منطقة حدودّية أخرى تشمل أحوال القطب الشمالي في أماكن مثل كندا، وألاسكا والساحل الشرقي لغرينلاند، وبحر البارنتس، وبحر أوخوتسك وبحر الكارا أو بحر تشوكتشي. ويُشمل كذلك الساحل الشرقي لكندا في بعض الأحيان في النقاش حول تطوير القطب الشمالي. وفيما لا تقع منشآت هذه المنطقة شمال دائرة القطب الشمالي، غير أنها يمكن أن تتعرض لدرجة حرارة وأحوال تجمّد مشابهة. وقد قُدّر أن مناطق القطب الشمالي باحتوائها على حوالى 25 في المئة مما تبقى من الموارد الهيدروكربونية التقليدية غير المكتشفة في العالم (الشكل 2 ـ 26).

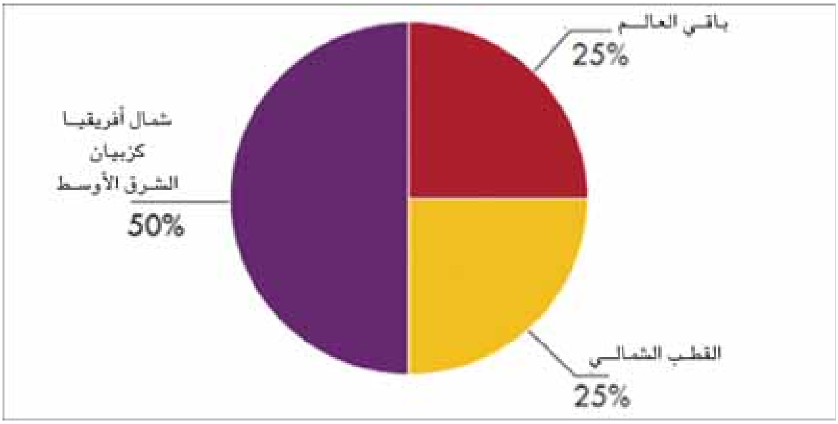
القطب الشمالي

إن كثيراً من التحديات مشابهة للتحديات التي وجدت في مناطق المياه العميقة: البعد، وسلامة أطقم العمل، والأثر البيئي، والكلفة العالية. ولابدّ من إضافة المناخ البارد، ومخاطر الجليد، والجبال الجليدية (الشكل 2 ـ 27).

ظلت الصناعة تدفع التقانة بانتظام إلى استحداث وسائل للوصول إلى

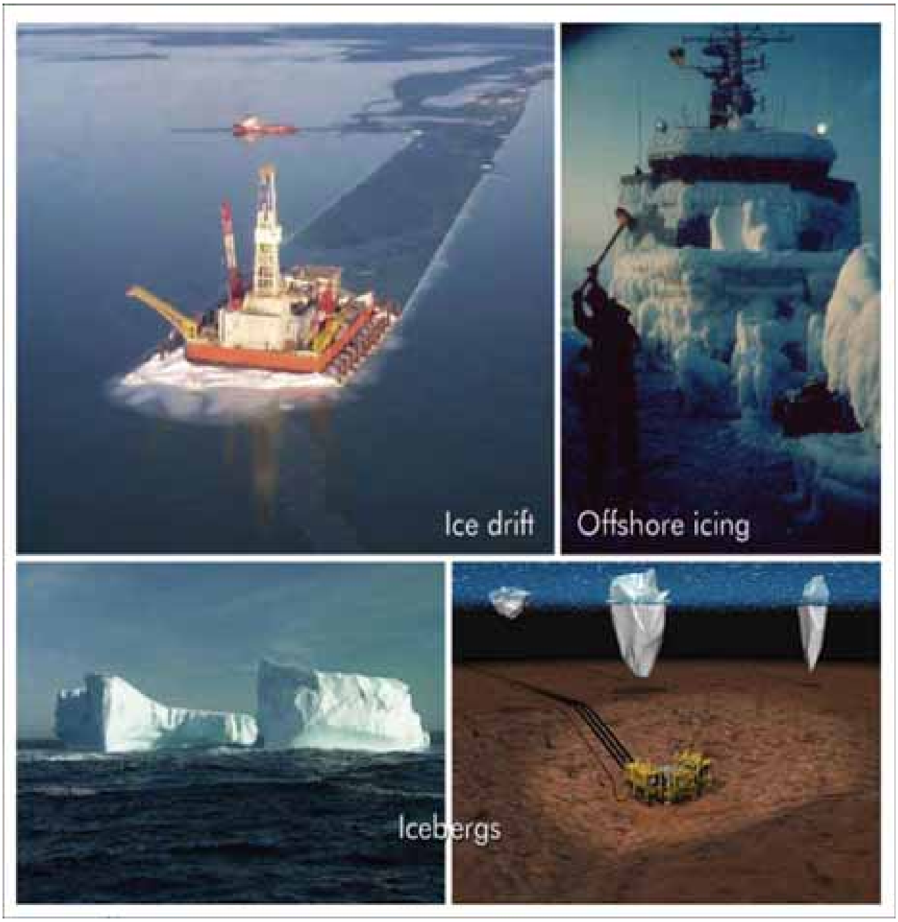
احتياطيات جديدة. وهناك أمثلة من الماضي والحاضر مثل هيبيرنيا (Hibernia) وتيرانوفا (Terra Nova) الشرقي لكندا، سنوهفيت (SnØhvit) في بحر بارينتس، وحقول قبالة ساحل جزيرة سخالين في الشرق الأقصى الروسي. ينتقل التوجه من منصات ضخمة أنشئت لتحمل الجبال الجليدية إلى منشآت أقل حركية بشكل أكبر مرتبطة بآليات كشف وانحراف الجبال الجليدية. وتظهر أيضاً حلول نقل جديدة (الشكل 2 ـ 28).

ومع ذلك ظلت التكاليف عالية، أي بين ثلاث إلى خمس مرات من تكاليف المشاريع المشابهة في مواقع معتدلة مناخياً. ومن الممكن أن يعوّق هذا الأمر مشاريع القطب الشمالي المستقبلية المتوسطة ذات قدرات إنتاج أكبر. وقد جرى حتى الآن تطوير عدد محدود من المشاريع. وقد اقترح منحني تعلم حاد لاكتشاف وسائل جديدة تحد من رأس المال وكلفة التشغيل، غير أنه من المبكر جداً التنبؤ بالسرعة التي سيتم فيها تحديد موارد القطب الشمالي وتطويرها. هناك عدة مناطق واعدة في المياه الروسية وشمال سيبيريا حيث يكون عمق الإفريز القاري أقل من 200 متر، حتى في المسافات البعيدة من الساحل. وستعتمد التطورات على سياسات الحكومة الروسية. سنفترض في الفصل السابع أن معظم موارد القطب الشمالي التقليدية ستصبح أخيراً اقتصادية بأسعار النفط على المدى الطويل ما بين 20 دولاراً (كما في حالة المشاريع التي طورت) و60 دولاراً للبرميل (تقريباً ثلاثة أضعاف السعر الاقتصادي المعتاد للموارد التقليدية في المواقع المعتدلة خارج الشرق الأوسط).



الشكل (2 ـ 26): مساهمة القطب الشمالي في موارد النفط والغاز غير المكتشفة

اعتمدت على معطيات الـ USGS. وتقدمة: OG21، فريق عمل من وزارة النفط والطاقة النرويجية.



الشكل (2 ــ 27) : أخطار القطب الشمالي

انجراف الجليد وصور جليديات مصدرها شركة ستات أويل، وصور جبال جليدية مصدرها خَفَر الجليد الدولي لحرس ساحل الولايات المتحدة. الموقع الإلكتروني: <http://www.uscg.mil/lantarea/iip/photo-gallery/icebergs-1.shtml>.

مخطط تحت بحري مصدره بترولانادا مصدره P.G.Grini من OG21، فريق العمل في وزارة النفط والطاقة النرويجية.

الشكل (2 ـ 28): حلول للنقل الحديث في بحار القطب الشمالي

المصدر: Aker Arctic، مع الشكر إلى P.G.Grini

تقدمة: OG21، فريق العمل في وزارة النفط والطاقة النرويجية.

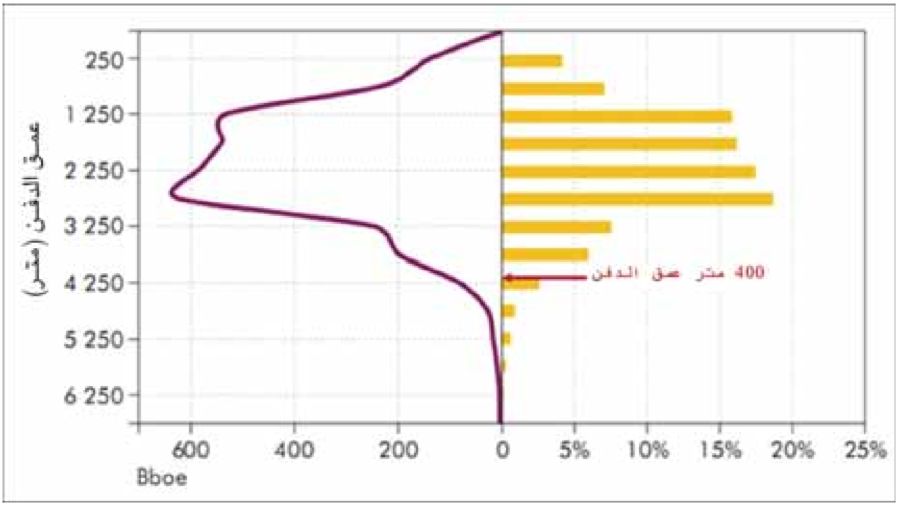
احتياطيات الأعماق السحيقة

تظهر التقويمات الحالية للموارد، كما هو مبيّن في الشكل 2 ـ 29 ندرة الرسوبيّات على عمق أكثر من 4000 متر (سواء أكانت على اليابسة أم في البحر). ومع ذلك، فقد يكون هذا بسبب غياب التنقيب العميق أكثر من أي سبب رئيس آخر. وفي الحقيقة، أظهر مسح للأحواض الرسوبية حول العالم أن الكثير منها تحتوي على رسوبيّات بسماكة تصل إلى 10كم (خليج المكسيك، وحوض الكونغو، وغرب سيبيريا. انظر شكل 2 ـ 30). ولا يوجد سبب يمنع هذه الرسوبيّات العميقة من أن تحتوي على هيدروكربونات.

تاريخياً، كانت المشاريع العلمية العامة رائدة في تقانة حفر الآبار العميقة جداً. مثلاً، وصل مشروع الحفر العميق جداً (KTB) في ألمانيا إلى 9000 متر، ووصل عمق بئر شبه جزيرة كولا (Kola Peninsula) العميق جداً في روسيا إلى 12000 متر. وتدعم وزارة الطاقة في الولايات المتحدة نقل هذه الجهود إلى

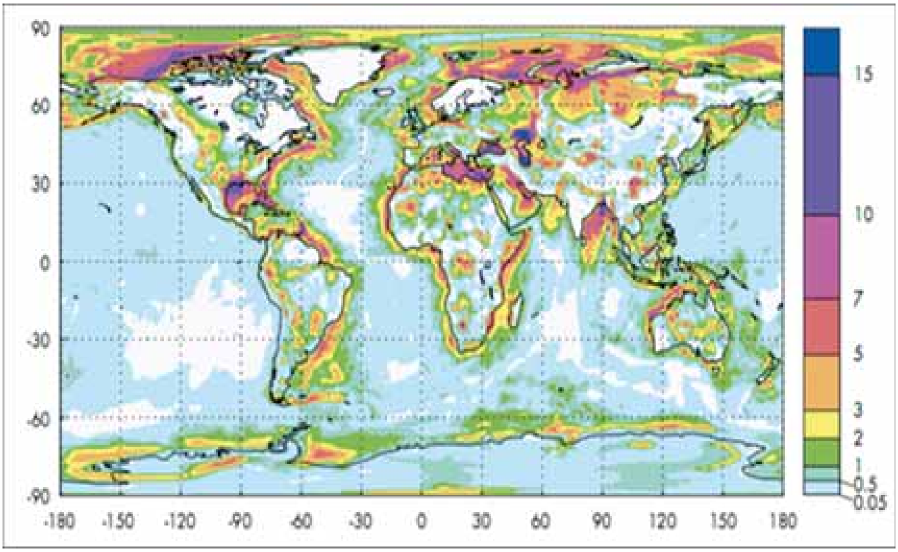
التطبيقات الصناعية حالياً كجزء من برنامج رحلة الأعماق (Deep Trek). ومن المرجح أن يكون للتقانات الإلكترونية الجديدة، والمواد الجديدة، وتقانات الحفر الجديدة التي تعتمد على الكابلات، وتقانات إتمام الآبار الجديدة مثل تقانات الحفرة أحادية الحفرة صلة وثيقة بالموضوع.

يمكن أن تصل الموارد ذات الإمكانيات، غير الموارد المشمولة حالياً في التقويمات العالمية المنشورة بسهولة إلى 300 مليار مكافئ برميل نفطي، أي 25 في المئة، بعضها سائل (نفط) والباقي غاز. وتأتي الموارد التي يمكن أن توجد هناك في قمة التقويم الحالي لهيئة المسح الجيولوجي الأميركي جزئياً، في الأقل. وهكذا ستضاف إلى كمية التقويم لإجمالي الهيدروكربونات الموجودة في العالم. وعلى الرغم من التحديات التقنية، فإن احتياطيات الأعماق السحيقة ستكون جذابة عندما تكون بالقرب من بنية تحتية موجودة، تحت مناطق إنتاج ناضجة مثلاً. ومن الصعب تقويم الأسعار التي ستجعل موارد كهذه موارد اقتصادية في هذه المرحلة المبكرة. ورغم الذي قيل فإن الاحتياطيات العميقة استُثمرت بنجاح، كما حصل في حقول إلغن فرانكلين (Elgin-Franklin) في بحر الشمال على عمق 6000 متر تحت قاع البحر. وبالإضافة إلى ذلك فإن الآبار التي تصل إلى أعماق 9000 متر موجودة في الخطط المرحلية لخليج المكسيك في الولايات المتحدة (Hart's 2005).



الشكل (2 ـ 29): تقويمات موارد الهيدروكربون بدلالة عمق الدفن

اليسار: كميات ببلايين البراميل من النفط المكافئ؛ **اليمين**: كنسبة مئوية من المجموع.
تقدمة: شركة توتال.



الشكل (2 ـ 30) : خريطة لسَماكات الرسوبيّات بالكيلومتر

المصدر: أعيد إنتاجها من معهد علوم المحيطات (Scripp) <http://mahi.ucsd.edu/Gabi/sediment.html>, and Laske (1997).

الفصل الثالث

موارد النفط غير التقليدي: النفط الثقيل، البيتومين، الرمال النفطية، الطَفَل النفطي

النفط الثقيل، البيتومين والرمال النفطية

تتوقع دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** نمواً مهماً في إنتاج النفط الثقيل والبيتومين (الحُمَر)، بشكل خاص من رمال النفط الكندية[1]. وفي الحقيقة، يشكّل النفط الثقيل والبيتومين قاعدة موارد كبيرة جداً توفر استثماراً جيداً. وتصل تقويمات موارد النفط الثقيل والبيتومين عالمياً إلى حوالى 6 تريليونات برميل، منها 2 تريليون برميل قد تكون قابلة للاستخراج بشكل نهائي. وقد انخفضت كلفة الإنتاج والعمليات بشكل كبير في العشرين سنة الماضية، ما جعل جزءاً من موارد رمال النفط الكندية اقتصادياً بأسعار نفط أقل من 20 دولاراً أميركياً للبرميل.

تتركز موارد النفط الثقيل بشكل كبير في كندا وفنزويلا اللتين يوجد فيهما على التتالي 2.5 تريليون و1.5 تريليون برميل. وإذا ما تم تأكيد الاحتياطي بمعدل استخراج 20 في المئة، فإن هاتين الدولتين وحدهما سيكون لديهما

---

(1) يُستخدم مصطلح «رمال القطران» في بعض الأحيان أيضاً، ولكن مصطلح «رمال نفطية» أكثر شمولية. وكما نوقش في النص فهناك صلة بين النفط الثقيل والبيتومين. وستستخدم هذه المصطلحات بحرية في هذه الدراسة، ولذلك فالنفط الثقيل أكثر شمولية.

احتياطي أكبر من الاحتياطي التقليدي في الشرق الأوسط. وفي الحقيقة، بوجود أكثر من 175 مليار برميل مؤكدة في عام 2003، فإن كندا تملك حالياً ثاني أكبر احتياطي مؤكد في العالم بعد السعودية. وقد حصلت معظم التطورات التقنية الحالية في كنداحيث حفّزت التسهيلات الضريبة المغرية ونظام ملكية النفط الثقيل والرمال النفطية، التي قُدّمت عام 1996، استثمارات جديدة كبيرة من الصناعة الخاصة. وكما هو موضح في الشكل (3 ـ 1)، فإن لدى روسيا تملك أيضاً احتياطيات مهمة من النفط الثقيل.

توجد أنواع مختلفة من النفط الثقيل، وكل منها يتطلب وسائل مخصصة. أما الأنواع الرئيسة فقد تمت مناقشتها في الأسفل.

البيتومين القابل للاستخراج

يمكن استخراج بعض الرمال النفطية من على السطح (الشكل 3 ـ 2). ويستخرج القطران أو البيتومين من الصخر باستخدام الحرارة، الماء و/أو المذيبات لمعالجة هذا «الخام» المستخلص. ويحتاج البيتومين المستخرج للتحسين أو المزج بهيدروكربونات أخف قبل نقله بالأنابيب إلى مصافي التكرير. ويشمل التحسين إضافة نسبة الهيدروجين إلى الكربون، إما عن طريق «تكرير» (إزاحة الكربون) أو بواسطة التقطير الهيدروجيني (إضافة الهيدروجين). وتنتج من ذلك ما يعرف بـ «النفط الخام الصناعي» الذي يمكن نقله إلى مصافي التكرير.

توجد الرمال النفطية القابلة للاستخراج أساساً في كندا حيث تمثّل رمال أثباسكا (Athabasca) في ألبرتا وحدها موارد تتكون من 600 مليار برميل نفط (مع أن بعضها يمكن استخراجه فقط). في عام 2004، كان يُنتج 600,000 برميل من النفط الخام المصنع من عمليات الاستخراج للرمال النفطية الكندية يومياً. ويمكن أن تنمو مستويات الإنتاج إلى مليون ومليوني برميل يومياً في عام 2012. ويعرض الشكل 3 ـ 3 الانحدار التدريجي في الكلفة على مدار العشرين سنة الماضية.

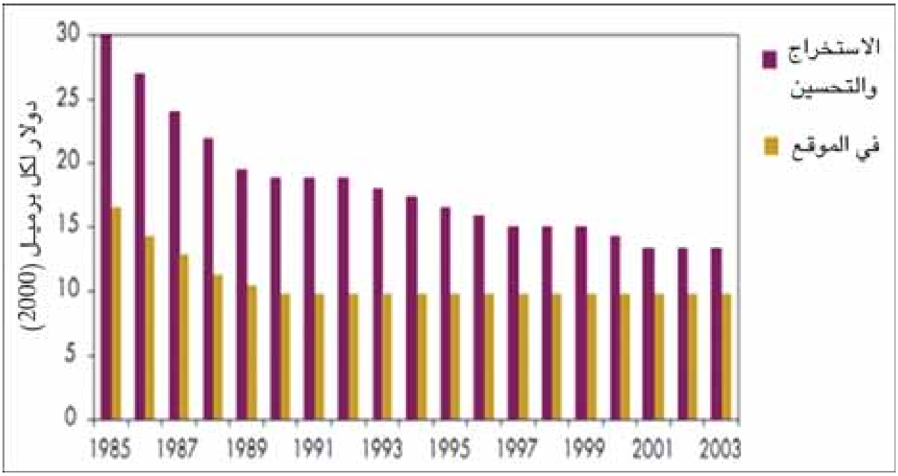
الشكل (3 ـ 1): موارد النفط الثقيل في العالم

أعيد إنتاجها بعد أخذ الإذن من معهد الطاقة، طبعت بالأصل في تقانة النفط الحديث

تقدمة: Mauric Dussealt، جامعة وترلو، من أجل إظهار هذا الشكل.

الشكل (3 ـ 2): تكشف الرمال النفطية في كندا

تقدمة: Pat Collins, Private Consultant, Calgary, Canada, with thanks to Maurice Dusseault, University of Waterloo, Canada.



الشكل (3 ـ 3): كلفة إنتاج النفط من الرمال الكندية

المصدر: WEO-2004, IEA.

النفط الثقيل ذو اللزوجة العالية

إن بعض أنواع النفط الثقيل والبيتومين ذات لزوجة عالية لا تمكنها من التدفق في أحوال احتياطي النفط. وتوجد هذه الأنواع عادة في أعماق ضحلة نسبياً. ومع ذلك، فإنها تعتبر غير ممكنة الاستخراج بسبب عمقها. تكون درجة الحرارة منخفضة في أعماق كهذه، فلذلك تكون اللزوجة عالية. لذلك فإنها تحتاج إلى تقانات إنتاج خاصة تسهّل تدفقها من احتياطي النفط إلى رأس البئر. تقليدياً، كانت تقانات «تدفق البخار» التي تشتمل على حقن بخار ساخن لتسخين النفط الموجود، وبذلك تقلل لزوجته وتسمح له بالتدفق. إلا أنه خلال العشر سنوات الأخيرة شهدت ظهور عدة وسائل جديدة مثل مساهمة البخار في تصريف الثقالة (steam-assisted gravity drainage SAGD) أو إنتاج النفط الثقيل البارد بالرمل(cold heavy oil production with sand). في الوقت الذي بدأ فيه مؤخراً تطبيق واسع النطاق لهذه التقانات، فمن المتوقع أن يتعزز الإنتاج بشكل مهم على مدار السنوات القليلة القادمة. وفي الحقيقة، قامت هذه التقانات بتحسين الاقتصاديات إلى حيث يمكن إنتاج النفط الثقيل الكندي والبيتومين بأعلى بأسعار نفط أقل من 20 دولاراً أميركياً للبرميل (الشكل 3 ـ 3). مثلاً، يقترب الإنتاج الحالي للنفط الثقيل والبيتومين في كندا من مليون برميل في كل يوم، ويمكن أن يتضاعف في العام 2012.

النفط الثقيل الأسهل انسياباً

مع ذلك هناك مجموعة أخرى من النفط الثقيل الذي يمكنه التدفق بدرجة حرارة احتياطي النفط. ولذلك يمكن إنتاجه اقتصادياً من دون إضافة تقانات مخفضة للزوجة من خلال عمليات تقليدية مختلفة مثل الآبار الأفقية الطويلة، أو الآبار متعددة الجوانب[2]. هذه هي مثلاً حالة حزام أورنوكو (Orinoco) الفنزويلي، أو في احتياطيات قبالة الساحل البرازيلية، غير أن أنواع نفط كهذه تكون لزجة جداً على السطح ما يصعب نقلها من خلال خطوط الأنابيب التقليدية. ولذا فهي بحاجة إلى خطوط أنابيب مسخنة تكون ملائمة لمسافات قصيرة فقط. أو يجب إما تحسينها قبل نقلها أو مزجها بالهيدروكربونات الخفيفة لصنع مزيج أقرب إلى النفط الخام التقليدي.

ومع ذلك، توفر هذه العمليات التقليدية عامل استخراج منخفضاً بشكل معقول. وقدرت فنزويلا كمية النفط الثقيل القابل للاستخراج من خلال عمليات كهذه في حزام أورنوكو بنحو 250 مليار برميل، مقابل موارد موجودة تقدّر بـ 1700 مليار برميل. وسيضاعف تطبيق تقانة تخفيض اللزوجة معدل الاستخراج في الأغلب.

يصف الصندوق 14 إحدى التقانات الحالية الحديثة SAGD. ومع أن هذه التقانة تسمح بكلفة مقبولة لإنتاج النفط الثقيل باستخراج لا بأس به، غير أنها بحاجة إلى طاقة شديدة مثل كل تقانات استخراج النفط الثقيل. وهناك حاجة كذلك إلى الطاقة من أجل تسخين النفط والصخور. ويمكن الحصول على هذا الأمر من خلال تقانة الـ SAGD أو من خلال تقانات البخار التقليدية من خلال حقن البخار. ونحصل على البخار حالياً من خلال حرق الغاز. ومن ثم فإن النفط الثقيل أو البيتومين يحتاج إلى تحسينه قبل استخدامه في مصافي التكرير. ولذا يحتاج هذا الأمر إلى الهيدروجين الذي يأتي من الغاز الطبيعي أيضاً. ويحتاج كل برميل من النفط الثقيل المنتج في كندا إلى حوالى 30 م^3 من الغاز من أجل الإنتاج الحراري، و15 م^3 من أجل التحسين. ونتيجة لذلك يمكن أن يصبح إنتاج النفط الثقيل مقيداً بسبب وجود الغاز الطبيعي. ومن المتوقع،

(2) التقانات متعددة الجوانب هي عبارة عن تقانة ناشئة يتم من خلالها حفر «فروع» مختلفة في الاحتياطي من «خرطوم» البئر نفسه المحفورة من السطح. تسمح هذه التقانة بزيادة الإنتاج من دون أي زيادة تابعة في الكلفة. ويمكن العثور على وصف مختصر في الصندوق 8 في الفصل الثاني.

بالأخص في كندا، أن يعوق ذلك إنتاج النفط الثقيل حتى عام 2015[3].

يمكن التساؤل في عالم، حيث أصبح الحد من انبعاث الكربون أمراً مهماً جداً، عن المنطق في حرق الغاز (وقود غني بالهيدروجين) من أجل استخراج النفط الثقيل (وقود غني بالكربون). ويتطلب إنتاج النفط الثقيل طاقة أكبر بكثير من الطاقة المطلوبة لإنتاج النفط التقليدي. وفي الحقيقة، تستهلك عمليات الإنتاج في أعلى سلسلة صناعة النفط والغاز ما يعادل حوالى ستة في المئة من الطاقة التي تحتويها الهيدروكربونات المنتجة. ويمكن أن ترتفع هذه النسبة، بوجود النفط الثقيل، إلى 20 في المئة أو 25 في المئة. وفي كندا، من الممكن أن يقوّض انبعاث غاز الـ CO_2 المرتبط بزيادة كهذه في استخدام الطاقة تحقيق أهداف الانبعاثات وفقاً لاتفاقية كيوتو (kyoto protocol)، وبذلك تحد من زيادة إنتاج النفط الثقيل.

لذلك، من المهم تطوير تقانات طاقة و/أو الكربون أخرى تكون أكثر فعالية. ويناقش في كندا منهجية قاسية لحلول تقضي بإنشاء محطة طاقة ذرية بالقرب من حقول النفط الثقيل من أجل الحصول على الطاقة المطلوبة. ويبحث اتحاد الصناعة كذلك في استخدام الطاقة الحرارية الجوفية من الصخور العميقة تحت احتياطيات النفط الثقيل. وهناك إمكانية أخرى للحصول على غاز الـ CO_2 المنتج بواسطة التسخين ومصانع التعديل وحفظه في تكوينات جيولوجية. وهذه الأخيرة موجودة غير أنها ستزيد كلفة الإنتاج بحوالى خمسة دولارات إلى سبعة دولارات أميركية لكل برميل، بافتراض أن الكلفة القياسية للحصول على الكربون وخزنه (CCS) هي 50 دولاراً للطن (IEA CCS, 2004)، مع أن بعض العمليات التي تحتوي على تدفق غاز الـ CO_2 النقي جداً، ستكون ذات كلفة أقل للحصول عليه.

ومع ذلك يمكن لتحسينات أخرى في تقانات الإنتاج أن تساهم أيضاً. فقد جرى تطوير خريطة طريق لتقانة الرمال النفطية المفصلة من قبل غرفة ألبرتا للموارد (ACR, 2004). وقد أشارت الدراسات التي أُجريت من أجل خريطة الطريق هذه (Flint, 2005) إلى أن عدد كبير من التقانات تستطيع خفض كمية غاز الـ CO_2 الذي ينتج في أثناء مختلف خطوات العملية. وتُطبّق تقانات

(3) التزويد بالماء أيضاً يوجِد قيوداً، بشكل خاص من أجل عمليات الاستخراج، يمكن العثور على تفاصيل أكثر في ACR-2004.

متنوعة لمختلف خيارات الإنتاج (مثل SAGD المدعّم بالغاز الطبيعي).

فيما يقدم كل خيار مكاسب ممكنة متنوعة، فمن الممكن الحد من غاز الـ CO_2 المنتج بمعدل 25 في المئة. ويشكّل غاز الـ CO_2 المنتج من المنشآت المحسنة تدفقاً نقياً يمكن الحصول عليه بكلفة منخفضة نسبياً. ويمكن تطبيق هذا كذلك على منشآت البخار إذا كانت تعمل بالاعتماد على تحويل بقايا النهاية الثقيلة إلى غاز. وأخيراً، فإن لدى كندا وفنزويلا فرصاً جيدة لإعادة تدوير غاز الـ CO_2 الذي يُحصل عليه لاستخدامه في برامج الاستخراج المكثّف للنفط في حقول النفط التقليدي. وبذلك يكون من المنطقي توقع اختفاء الحد من الغاز وغاز الـ CO_2 اللذين يؤثران في الإنتاج المستقبلي للنفط الثقيل مع مرور الزمن بزيادات طفيفة في الكلفة فقط.

إن عدداً من تقانات الإنتاج البديلة ما زالت في طور الدراسة أو التطوير المبكر.

- يمكن للإحراق في الموقع الأصلي أن يوفر طاقة لتسخين النفط وتسهيل تدفقه. وهذه التقانة موجودة منذ سنوات، غير أن الصعوبات في ضبط العمليات كانت عقبة حالت دون استعمالها الواسع. ويجري الآن دراسة خيارات جديدة تشمل التطور الحالي في وضع الآبار الأفقية بدقة. مثلاً هناك حقن الهواء بطريقة من الأمام إلى الخلف (Toe-to-heel-air-injection).

- تشمل التقانات الميكروبية (نوقشت في الفصل السابق) حقن الميكروبات في احتياطي النفط حيث تبذل إمكانياتها لتفكيك جزئيات الهيدروكربونات الثقيلة إلى جزئيات أخف. غير أن هناك حاجة إلى بحوث جوهرية أكثر.

- جُرّب استخدام الهيدروكربونات الخفيفة لتحل محل أو أن تعمل إلى جانب البخار لتخفيض لزوجة النفط. ولم يثبت أن هذه العملية المعروفة بـ VAPEX اقتصادية حتى الآن. ومن حيث المبدأ، هناك خيار آخر يقضي بفصل بعض النفط المنتج إلى مكوّنات خفيفة وثقيلة، وإعادة حقن المكوّنات الخفيفة كمحلّلات لتساعد الإنتاج، واستخدام المكوّنات الثقيلة لتوفير طاقة لعمليات الإنتاج والتحسين. وقد طوّر مشروع في هذا الاتجاه وهو مشروع Nexen/OPTI البحيرة الطويل (<http://www.longlake.ca>) الذي سيستخدم مكونات ثقيلة كوقود لتشغيل عملية SAGD نموذجية، وبذلك يتم التخلص من الحاجة إلى الغاز. وسيصبح هذا المشروع جاهزاً للعمل في عام 2006

بمستوى إنتاج 70000 برميل في اليوم ورؤية اقتصادية في أسعار النفط تبلغ حوالى 20 دولار للبرميل. ولاتزال الشركات الأخرى في مراحل تخطيط متنوعة لأسلوب كهذا.

بوجود حافز ضريبة مناسب وإطار عمل ذي عائدات، فإن سجل الصناعة الخاص في تطوير التقانات المطلوبة سجل ممتاز. ومن المتوقع، من حيث المبدأ، أن يكون الطلب على النفط الثقيل كبيراً بشكل كاف لتعزيز هذا السجل. وما يجدر ملاحظته أن النفط الثقيل لا يتحمل أعباء مخاطر التنقيب. وقد جرى تحديد الاحتياطيات الكبيرة في كندا وفنزويلا بشكل ممتاز، كما يمكن تعيين معظم المناطق الواعدة بكلفة منخفضة لأن الأعماق ضحلة. ولذلك، يمكن تركيز كل الجهود على تعديل كلفة الإنتاج لكلٍّ من رأس المال والعمليات. ومع ذلك، تظهر الآن أساليب منافسة لإنتاج وقود سائل بديل للنقل في توقع تراجع إنتاج النفط التقليدي. ومن الأمثلة على ذلك، تقانة تسييل الغاز لتحويل الغاز الطبيعي إلى وقود سائل، أو اشتقاق وقود مصنّع من الفحم، أي تسييل الفحم (coal-to-liquids). ونتيجة لذلك، فمن الممكن أن تزداد مخاطر الاستثمار في إنتاج النفط الثقيل، ما سيؤدي إلى عجز في الاستثمار.

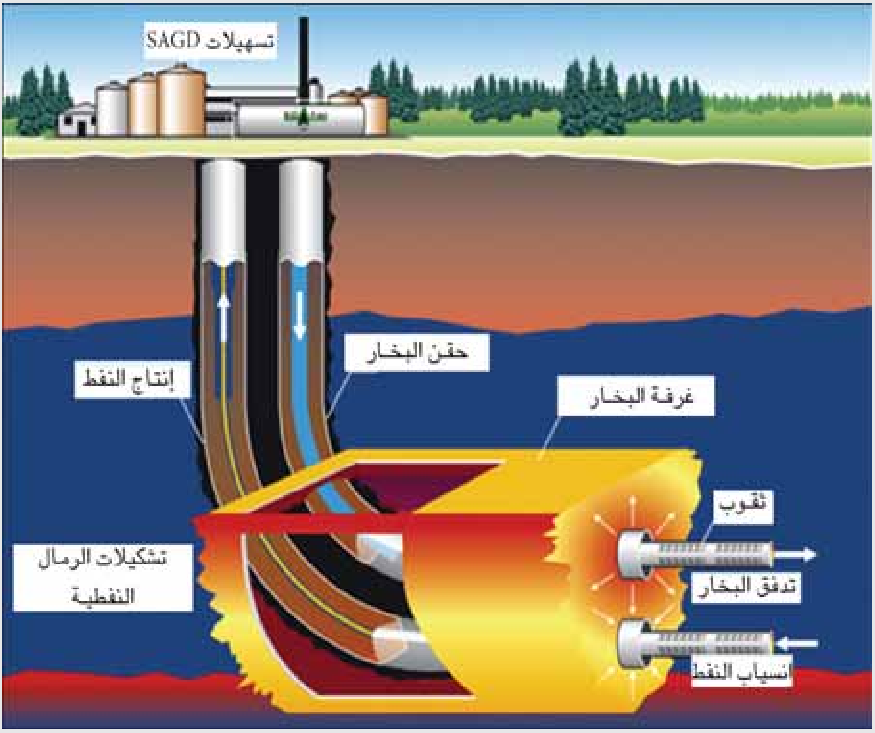
الصندوق 14

مساهمة البخار في تصريف الثقالة (SAGD)

لقد كان «تدفق البخار» لفترة طويلة من الزمن التقانة المفضلة لإنتاج النفط الثقيل. فقد كان البخار واسطة لتسخين النفط (تخفيض لزوجته وجعله قابلاً للتدفق) ودفعه باتجاه آبار الإنتاج. غير أنه لسوء الحظ، فإن لهذه التقانة كفاءة طاقة منخفضة جداً (يضيع الكثير من طاقة التسخين ولا تستطيع إيصال النفط إلى مرحلة السيولة). وعامل الاستخراج منخفض كذلك بما يمكن للبخار اختراق النفط أو تجاوز النفط بسبب الجاذبية.

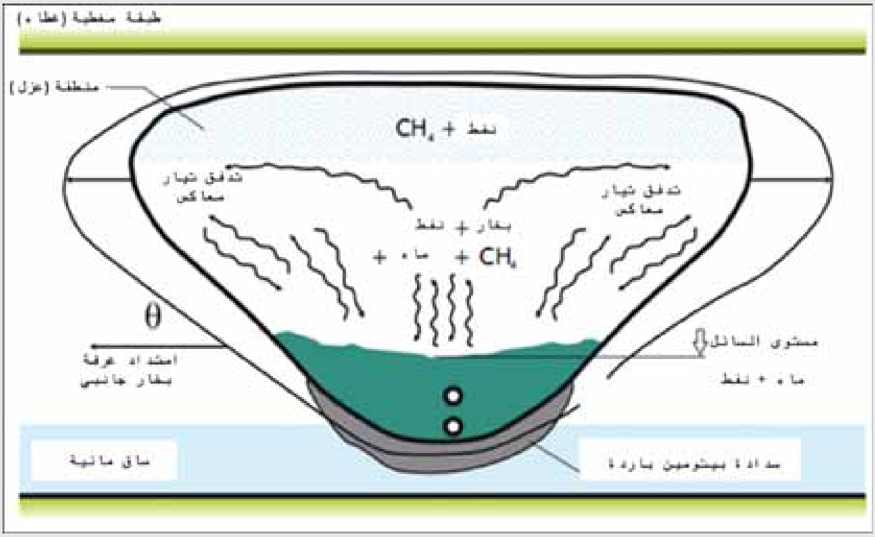
لقد أدى ظهور الآبار الأفقية المموضعة بدقة إلى تطوير الـ SAGD. وكما هو معروض في الشكل 3 ـ 4، تُحفر بئران أفقيان، إحداهما فوق الأخرى. وتكون البئر العلوية من أجل حقن البخار، وأما البئر السفلية فتكون لإنتاج النفط. ويؤكد نظام البئر المزدوجة كفاءة استخدام التسخين ضمن

«غرفة بخار» افتراضية، كما إنه يعطي معدل استخراج ممتاز بواسطة تصريف الجاذبية، حيث توازن جاذبية السطح البيني بين النفط والبخار. ويمكن أن تصل عوامل الاستخراج إلى نحو 60 في المئة. ويعني التباطؤ الداخلي في تصريف الجاذبية معدلات إنتاج منخفضة إذا كان من غير الممكن حفر آبار طويلة أفقية يمكن لبئرين منها تصريف كميات كبيرة. إن حجر الزاوية في هذه التقانة الواعدة هو الكفاءة القابلة للتطوير من قبل الصناعة على مر السنوات العشر الماضية وضع الآبار الأفقية بشكل دقيق جداً على مسافات طويلة. وبما إن الآبار ضحلة نسبياً، فضلاً عن أن كلفة الحفر منخفضة بما فيه الكفاية لجعل التطورات الكبيرة مع عدة آبار سهلة المنال. ولقد نالت تقانة الـ SAGD ما عملت من أجله خلال السنوات الثلاث أو الأربع الماضية، ولديها الآن تأثير كبير في اقتصاديات إنتاج النفط الثقيل.



الشكل (3 ـ 4): عرض تخطيطي لتصريف الجاذبية بمساعدة البخار

تقدمة: .Encana Corp و Maurice Dusseault، جامعة ووترلو ـ كندا.



الشكل (3 ـ 5): عـرض تخطيـطي لتصريـف الجاذبيـة بمساعـدة البـخـار (SAGD) ـ مقطع عرضي

تقدمـة: Maurice Dusseault، جامعة ووترلو ـ كندا.

قد لا يهم هذا من ناحية أمن الإمداد، إذ إن هناك إمداداً كبيراً جداً لكلّ من الموارد الثلاثة للطاقة. وأما من أجل تنوّع الإمدادات، فربما ترغب دول الـ IEA في دراسة كيفية ضمان وصول هذه الأساليب إلى أسعار تنافسية. وقد نوقشت المنافسة المستقبلية بين نقل المحروقات من نفط ثقيل، وغاز، وفحم بشكل أوسع في الفصل السابع. وتفضل أسعار النفط الأعلى بالطبع تطوير كل هذه الموارد البديلة للمحروقات، كما عرض في سيناريو أسعار النفط العالية لدورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004. وتفترض الدورية أن زيادة عشرة دولارات أميركية في أسعار النفط تزيد إنتاج النفط غير التقليدي بنسبة 1,5 مليون برميل يومياً بحلول عام 2030.

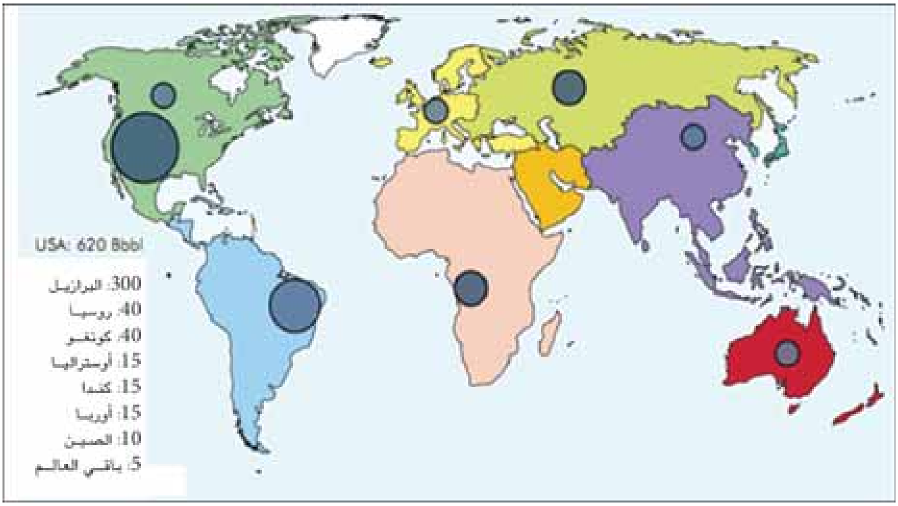
بشكل عام، من المنطقي توقّع أن التطور التقاني سيمكّن معظم موارد النفط الثقيل في كندا وفنزويلا وأمكنة أخرى أن تصبح اقتصادية في أسعار النفط المدعومة بين 20 دولاراً أميركياً و40 دولاراً أميركياً، بما في ذلك كلفة تخفيف انبعاثات غاز الـ CO_2 المرافق لعمليات الإنتاج. ويجب التأكيد، مع

ذلك، أن إنتاج كمية ضخمة كهذه من الموارد لا يمكن أن تتم إلا في فترات طويلة من الزمن. ومع كلفة رأس المال الحالية للرمال النفطية الكندية التي تبلغ حوالى خمسة بلايين دولار أميركي لإنتاج 200000 برميل يومياً، يبدو ببساطة أن حشد رأس المال لاستخدامه من أجل جزء مهم لهذه الموارد سيستهلك عدة عقود.

الطَفَل النفطي

لا يحتوي الطَفَل النفطي في الحقيقة على نفط أوعلى طين صفحي. ويصف المصطلح نوعاً من الصخر ـ يشبه الطَفَل النفطي، والكربونات، والمرل (الصلصال الكلسي) ـ يحتوي على كمية كبيرة من المركبات العضوية الصلبة تُعرف عموماً كيروجين (kerogen). وإذا ما كانت مدفونة في أعماق كافية لتحويل الكيروجين بتأثير الحرارة، فإن رَسوبيّات من هذا النوع ستولد نفطاً أو غازاً. ولكنها توجد في أعماق ضحلة نسبياً، ولم تسخن بشكل كاف قط. ويمكن تسخين الكيروجين الموجود في الرَسوبيّات حتى درجة حرارة تبلغ حوالى 500 درجة مئوية لإنتاج نفط سائل، يعرف كطَفَل نفطي. ويمكن استخدام الطَفَل النفطي الخام مباشرة كوقود مشابه لفحم منخفض النوعية. وفي الحقيقة، استُخدم الطَفَل النفطي بهذا الشكل لعدة قرون. وقد أُنتج النفط من الطَفَل النفطي في القرن التاسع عشر.

لماذا نفط الطَفَل بهذه الأهمية؟ لأنه يمكن أن يمثل مورداً احتياطياً ذا إمكانية كبيرة جداً إذا كان قابلاً للاستثمار بشكل اقتصادي. وقد قُيّم الطَفَل النفطي عالمياً بأنه يحتوي على هيدروكربونات تصل بمجموعها إلى ما يعادل 2,6 تريليون مكافئ برميل نفطي، منها 1.6 تريليون في الولايات المتحدة. وبعرض الشكل 6,3 ما قدّر أنه نفط قابل للاستخراج من الطَفَل النفطي حول العالم. وتفترض الأشكال إمكانية استخدام 50 في المئة من نفط الطَفَل المحدد وتحويل 75 في المئة من الكيروجين إلى نفط. وذكرت مراجع أخرى تقويمات مختلفة قليلاً (مجلس الطاقة العالمي: <http://www.worldenergy.org/wec-geis/publication/reports/ser/shak/shale.asp>) تقدّم تفسيرات مختلفة للمعرفة الحالية المحدودة، تشمل إشارات لمخزون مهم في الأردن <http://www.worldenergy.org/wec-geis/edc/countaies/jor dan.asp>.



الشكل (3 ـ 6): يبلغ مجمل توزع الطَفَل النفطي حول العالم 1060 مليار برميل من النفط القابل للاستخراج

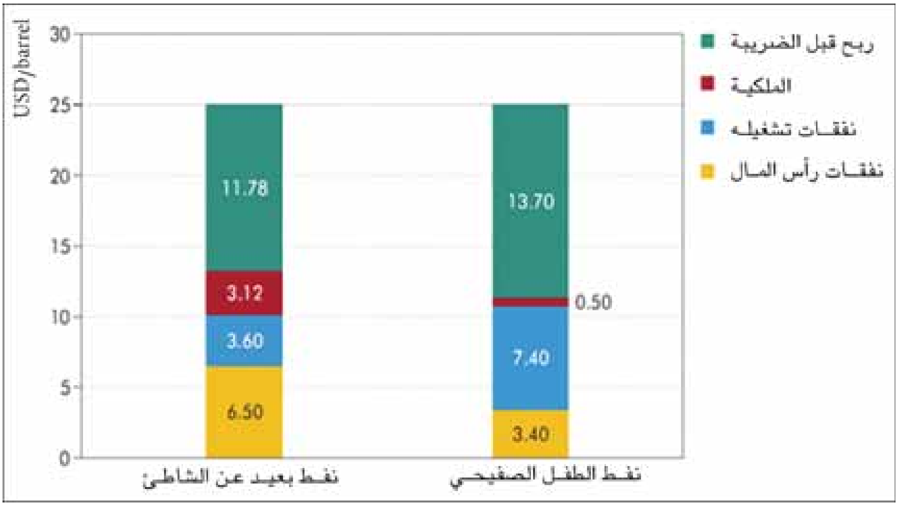
المصدر : *Encyclopedia Britannica* (2005).

تملك الولايات المتحدة إلى حد كبير أكبر مخزون معروف. إذ كانت هذه الموارد دوماً مورداً عظيم الأهمية بالنسبة إلى حكومة الولايات المتحدة من حيث تقديم مفتاح ضمان الإمدادات على المدى الطويل. وقد أجرت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة برنامجاً واسعاً في النصف الثاني من السبعينيات توصل إلى تطوير تقانة جوهرية، وعدد من العروضات التوضيحية. ومع ذلك، لم يكن الطَفَل النفطي في الثمانينيات قادراً على منافسة النفط الخام المستورد، ولذلك أوقف البرنامج. وقامت وزارة الطاقة بمراجعة للطَفَل النفطي في عام 2004 (DOE Shales 2004) احتوى على تقويم للوضع التقاني.

استخدمت حفنة من الدول الطَفَل النفطي على نطاق صغير. فقد كان لدى إستونيا صناعة طَفَل نفطي نشطة، وذلك بشكل كبير لتوفيره كوقود من أجل توليد الكهرباء، ولإنتاج كمية صغيرة من النفط أيضاً. وتوجد في كلٍّ من البرازيل والصين منشآت صغيرة رائدة للطَفَل النفطي. وأما أستراليا فلديها عمليات رائدة تستخدم مخزون ستيوارت للطَفَل النفطي، غير أن الخطط لإدخال عمليات صناعية على مستوى كبير في حالة توقف وذلك بسبب المخاوف البيئية.

يمكن استخراج الطَفَل النفطي الذي يظهر على السطح، أو على عمق ضحل، باسلوب يشبه إلى حد كبير أسلوب استخراج الفحم أو الرمال النفطية، باستخدام تقانات استخراج نموذجية. ثم يسخن الصخر المستخرج في آليات تسمى تقطير المعوجّة (Retorting) تحلل الكيروجين حرارياً إلى نفط. وقد طوّر عدد من تصاميم تقطير المعوجّة. ومن هذه التصاميم، يتوقع أن يكون النموذج الأكثر حداثة والأفضل أداءً اقتصادي بسعر 25 دولاراً أميركياً للبرميل.

يعرض الشكل (3 ـ 7) رؤية لكلفة دلالية، وهو يصور بنية الكلفة التخمينية لمشروع ستوارت ذي الطور الثالث للطَفَل النفطي الأسترالي، يعتمد على منشأة تنتج 200000 برميل/اليوم، مقارنة ببنية كلفة لمشروع نفط تقليدي عادي قبالة الساحل. ويتوقع أن يجني مشروع أصغر مقترح في إستونيا ربحية بأسعار تبلغ حوالى 20 دولاراً أميركياً للبرميل.



الشكل (3 ـ 7): بنية كلفة مشروع طَفَل ستيوارت النفطي المقترح في أستراليا

من تقرير قسم الطاقة في الولايات المتحدة (DoE Shales 2004).

إلا أنه مع ذلك، كما في أي عملية استخراج، فإن استخراج الطَفَل النفطي يشمل أثراً بيئياً قد يكون مهماً، فلابدّ من التخلص من النفايات، وإصلاح الأرض، وتقليل الآثار إلى حدها الأدنى.

ومع ذلك فإن معظم الاحتياطيات أعمق من أن تستخرج وتتطلب بعض

أنواع التقطير المعوجّ في موضعها الأصلي. وفي أحد الأنواع المختلفة، تستخدم أولاً متفجرات وتشقيق هيدروليكي لتهشيم الصخر. وهي ضرورية لأن للطَفَل النفطي عموماً مسامية منخفضة جداً. ولهذا السبب، يجب إحداث معابر لتأكيد أن النفط الذي سيتشكل من التسخين قادر على أن يسيل تدريجياً باتجاه آبار الإنتاج. ومن ثم يجب تسخين الصخر إلى حوالى 500° درجة مئوية لإنتاج سائل الهيدروكربونات المطلوب من الكيروجين. ويمكن تزويد الحرارة من خلال الآبار باستخدام تقانات مختلفة، أو إحداثها في الموضع الأصلي عن طريق آليات حرق. والطريقة الأخيرة التي تشبه الحرق في الموضع الأصلي للنفط الثقيل، أو بتحويل الفحم إلى غاز في المكان الأصلي، وهي طريقة يصعب التحكم بها، قد مكنت مشاريع رائدة من إنتاج معدلات استخراج مختلفة. أما الأولى، فعلى الرغم من أنها أسهل للضبط إلا أنها آلية غير كفؤة نسبياً. ولا توفر التقانات المنفذة في الموضع الأصلي الوصول إلى مخزونات أعمق فحسب، غير أنها تتجنب كذلك كثيراً من المشاكل البيئية المرافقة للتعدين ولاستخدام الأرض. واستناداً إلى العروضات التي نفذت في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات، يتوقع لمعالجات كهذه أن تكون اقتصادية بأسعار تصل إلى 25 دولاراً أميركياً للبرميل. ومثلاً، طبقاً **لمجلة النفط والغاز** (25 نيسان/ أبريل 2005) تعمل شركة شل على مشروع تقطير معوجّ رائد في الموضع الأصلي باستخدام التسخين الكهربائي، يتوقع أن يكون اقتصادياً بأسعار تبلغ 20 دولاراً أميركياً للبرميل.

ورغم كل ذلك، تتطلب عمليات إنتاج الطَفَل النفطي، بالضبط كما في النفط الثقيل، طاقة أشد (وبالتالي تنتج كمية غاز الـ CO_2 أكبر) من إنتاج النفط العادي. وتشكّل عملية التقطير المعوّجة، فيما إذا نفذت على السطح أو في الموضع الأصلي، الطلب الأكبر على مدخل الطاقة، أي حوالى 30 في المئة من قيمة الطاقة للنفط المنتج. وإذا ما انتجت هذه الطاقة من الوقود الأحفوري، فإننا قد نحتاج إلى تحاشي انبعاث الـ CO_2 المحتمل المرافق من خلال احتواء غاز الـ CO_2 وتخزينه في تشكيلات جيولوجية. مثلاً، مقارنةً بإنتاج النفط التقليدي، يقدّر أن يقوم مشروع ستيوارت للطَفَل النفطي الأسترالي بتوليد 180 كغ إضافية من غاز الـ CO_2 لكل برميل يُنتج من النفط (<http://www.iea.org/textbase/work/2002/calgary/smithdoc.pdf>)

وبافتراض أن احتواء غاز الـ CO_2 وكلفة تخزينه ستبلغ 50 دولاً أميركياً

لكل طن، بالإضافة إلى التحسينات ذات الكفاءة المتوسطة في المشاريع المستقبلية، فإن الكلفة الإضافية ستكون قريبة من ثمانية دولارات أميركية لكل برميل. يجب ملاحظة أن التحاليل الاقتصادية في الشكل 3 ـ 7 تضمنت بعض كلفة تخفيف غاز الـ CO_2.

وكما تمّت الإشارة إليه، فإن تجربة كندا الحالية مع الرمال النفطية والنفط الثقيل تثبت القوة الجبارة للضريبة المغرية ونظام الملكية لجذب الاستثمار الجديد، فهل يمكن للأسلوب نفسه أن ينجح في تطوير الطَفَل النفطي؟. تعتقد وزارة الطاقة في الولايات المتحدة أنه من الممكن أن تنتج الولايات المتحدة مليوني برميل من النفط يومياً من الطَفَل النفطي المحلي بحلول عام 2020. وتبدو المشاريع المبكرة التي نوقشت اقتصادية بأسعار نفط مدعمة بحوالى 25 دولاراً أميركياً للبرميل، حتى مع كلفة تخفيف غاز الـ CO_2. غير أن هذه المشاريع تركز بوضوح على مواقع يكون تركيز الكيروجين في الطَفَل النفطي أعلى ما يمكن، في حين تعتمد الكلفة بشكل رئيس على حجم الصخر الذي يراد تسخينه، وليس على الكيروجين الموجود في ذلك الصخر. وفي الحقيقة، إن معظم موارد الطَفَل النفطي الكبيرة المحددة تكون في الأغلب تركيزات كيروجين أقل بمرتين إلى أربع مرات من تلك في المشاريع الرائدة. وهذا هو سبب وضعنا الإنتاج الاقتصادي في مستوى 25 دولاراً أميركياً و70 دولاراً أميركياً للبرميل من أجل استثمار قابل للتطبيق.

الفصل الرابع

موارد الغاز غير التقليدية وهيدرات الميثان

الغاز غير التقليدي

كما نوقش في الفصل الأول، لا يوجد تعريف خاص للـ «الغاز غير التقليدي». ويُستخدم المصطلح عادة للإشارة إلى أنواع احتياطيات الغاز التي طُوّرت مؤخراً، إلى الآن بشكل حصري تقريباً، في الولايات المتحدة. وتتكوّن في الأصل من نوعين: «ميثان طبقة الفحم» و«الغاز المحجوز». ويمثل هذان النوعان موارد كبيرة جداً تبلغ في الأقل 250 تريليون متر مكعب (1.5 تريليون مكافئ برميل نفطي) تقريباً، بقدر الغاز التقليدي نفسه. وتُستثمر هذه الموارد حالياً في المقام الأول في الولايات المتحدة، حيث توفر 25 في المئة من إنتاج الغاز.

طبقة الفحم الميثان

من المعروف جيداً أن معظم مخزونات الفحم تحتوي على الميثان الممزوز في الفحم. وطالما كان تحرير الميثان مصدر رئيساً للحوادث في مناجم الفحم، حيث يتم تخفيف هذا الخطر بالتهوئة لنقل الغاز خارجاً إلى الجو. وحتى وقت ليس ببعيد كان ميثان مناجم الفحم يحرر في الجو. غير أنه يوجد حالياً خوف من الميثان باعتباره غازاً دفيئاً قوياً يساهم في الاحتباس الحراري أكثر من غاز الـ CO_2 بـ 21 مرة، لكل وحدة كتلة. وقد دفع هذا القلق مؤخراً دولاً عديدة للبدء باستخراج غاز ميثان مناجم الفحم لاستخدامه في توليد الطاقة. وفي هذه العملية يحول غاز الـ CO_2، ما يقلل تأثيره في الاحتباس

الحراري بما يعادل سبع مرات (كما يتم تبديله بوقود آخر وإطلاقه).

تنتشر مخزونات الفحم حول العالم وتعدّن بشكل عام. غير أن ما هو غير معروف بشكل جيد هو حقيقة أن الكمية الأكبر من الفحم المدفونة في مخزونات في أعماق لا يمكن تعدينها.

وقد ركزت دراسات ومشاريع رائدة على تحويل الفحم إلى غاز في الموضع الأصلي لطبقات فحم عميقة كهذه، غير أن التقانة ليست واسعة الانتشار حتى الآن. وفي كل الأحوال ستكون ذات كلفة مقبولة فقط لمخزونات الفحم الضحلة نسبياً.

ويترك هذا كمية كبيرة من الفحم المدفون في أعماق الأرض الذي لا يمكن استثماره. ومع ذلك، كما هو حال الفحم في المناجم العادية، فإن طبقات الفحم العميقة هذه تحتوي أيضاً على ميثان ممزوز. إن ميثان طبقة الفحم (Coal Bed Methane) هو الميثان (يرافقه غازات هيدروكربونية خفيفة أخرى) الموجود في طبقات فحم كهذه حيث ألغى عمق المخزون أو نوعية الفحم السيئة الاستخراج الاقتصادي للفحم. والميثان الموجود في طبقات فحم كهذه يمكن استخراجه. والتقانة مشابهة جداً لتقانة الإنتاج في احتياطيات الغاز التقليدي، إذ تحفر الآبار في طبقة الفحم، فينخفض الضغط ويتحرك الغاز إلى السطح من خلال الآبار. وأما الصعوبات الرئيسة، فهي كما يأتي:

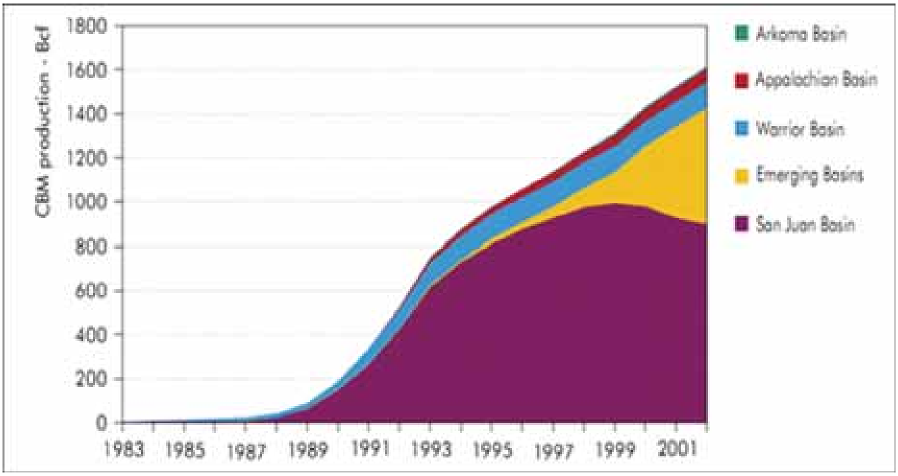
- تميل طبقات الفحم أن تكون ذات نفاذية ضعيفة، لذلك فإن السوائل لا تتدفق من خلالها بسهولة إلا إذا نشط احتياطي النفط، بالتشققات الهيدروليكية مثلاً.

- يمكن أن يحتوي الفحم على كميات كبيرة من الماء في فراغات مسامه، حيث يمتص الغاز على سطوح الفحم. وهذا يعني أنه غالباً ما ينتج كميات كبيرة من الماء قبل وصول أي غاز إلى السطح، ما يؤخر الإنتاج، وبالتالي القيمة الحالية الصافية للاستثمار في الآبار ومنشآت الإنتاج. كما إنها تزيد التكاليف، لأن هذا الماء بحاجة إلى التنسيق أو المعالجة قبل استخدامه.

- بما إنه لا توجد حتى الآن تقانة معتمدة بشكل كامل لتقدير كمية الغاز التي يمكن لطبقة فحم معينة إنتاجها، فإن عملية استخراج غاز الميثان غالباً ما تكون واحدة من محاولات الصح والخطأ.

لقد تم تطوير تقانات إنتاج موارد الغاز من طبقات الفحم بشكل اقتصادي في الولايات المتحدة، أساساً، من خلال برامج بإشراف وزارة الطاقة الأميركية في الثمانينيات تشمل أنظمة الضريبة الجذابة. ويمثل ميثان طبقة الفحم حوالى عشرة في المئة من إنتاج الغاز في الولايات المتحدة.

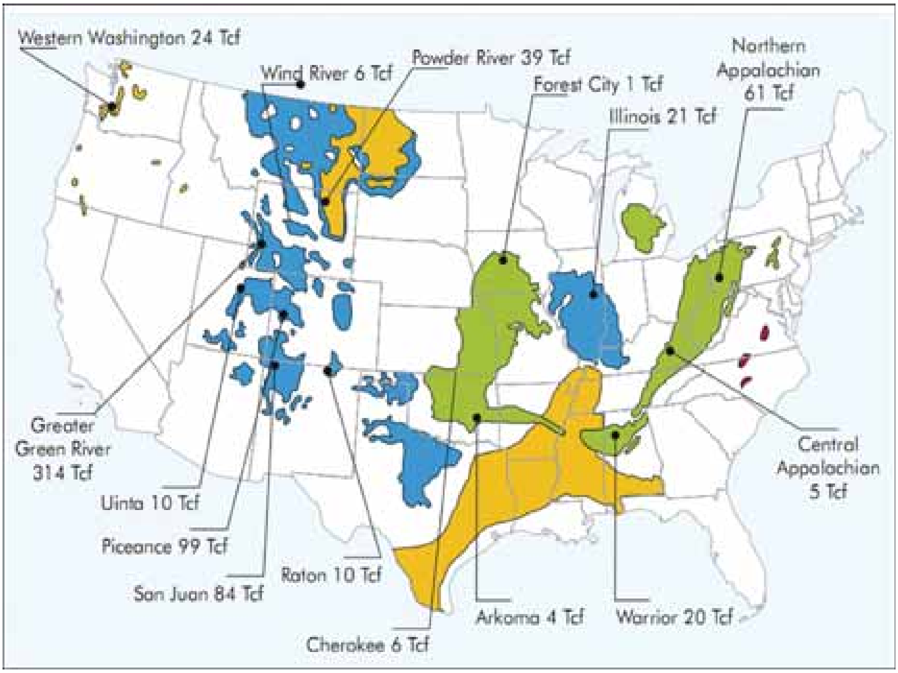
وتعرض الخريطة في الشكل 4 ـ 2 أحواض ميثان طبقة الفحم الرئيسة في الولايات المتحدة. ويجري الآن تطوير أحواض جديدة بسرعة، كما هو معروض في الشكل 4 ـ 1. ويتكون المفتاح لتطوير هذه الحقول بشكل اقتصادي بحفر عدد كبير من الآبار منخفضة الكلفة (انظر الفصل الثاني)، بما فيها آبار أفقية. وربما يكون ميثان طبقة الفحم منتشراً بكثرة حول العالم. ويعرف الآن بوجود كميات كبيرة بشكل ملحوظ في أستراليا، وكندا، والصين، وألمانيا، والهند، وأندونيسيا، وبولندا، وروسيا، وجنوب أفريقيا. (انظر مثلاً الجدول 3 في (White 2005. وستوجد هذه الموارد في أماكن مشابهة لأماكن الموارد الموجودة في الولايات المتحدة، في أعماق يصعب تعدينها، غير أنها ضحلة نسبياً بالمقارنة. ويُعرف القليل علاوة على هذه الدول، غير أن طبقات الفحم موجودة بالتأكيد في أعماق مختلفة في معظم الحقول الرسوبية التي تفترض أن الموارد غير المكتشفة موارد كبيرة جداً.



الشكل (4 ـ 1): إنتاج غاز ميثان طبقة الفحم في الولايات المتحدة، بالحوض

ملاحظة: واحد بليون قدم مكعب يكافئ 25 مليون متر مكعب أو 180000 boe.

تقدمة: معهد تكنولوجيا الغاز ـ الولايات المتحدة.



الشكل (4 ـ 2): موارد ميثان طبقة الفحم في الولايات المتحدة ـ 20 تريليون متر مكعب

تقدمة: معهد تكنولوجيا الغاز ـ الولايات المتحدة.

مع ذلك، أوضح مثال الولايات المتحدة، أن مفتاح الاستخراج الاقتصادي يكون بتركيز كبير للنشاط بشكل كاف لخلق اقتصاديات مقياس (Economies of Scale) في حفر آبار منخفضة الكلفة. وحتى الآن، فإن الوفرة النسبية لاحتياطيات الغاز التقليدي غزيرة الإنتاج في كثير من أنحاء العالم منعت استثمار ميثان طبقة الفحم على نطاق واسع خارج الولايات المتحدة. وقد طُوّرت مشاريع رائدة في بعض المناطق الأخرى (كندا، والصين، وروسيا). وبما إن التقانة الأساسية متوفرة للقسم الأكبر، فمن المتوقع أن تتقدم الأسواق المحلية بتطورات أكبر في هذا المجال. والقطعة الأساسية المفقودة في صورة التقانة هي الصفات المحسنة لاحتياطي نفط طبقة الفحم. وهذه مشكلة صعبة، إذ يكون التقدم بسببها بطيئاً في الأغلب. وقد ركزت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة جهوداً مهمة في هذا المجال في الثمانينيات. ومع ذلك، ما تجدر ملاحظته ظهور بعض المخاوف البيئية التي تدور حول استخدام الأرض والتخلص من

الماء باستخدام تقانة تطوير احتياطي النفط التي تعتمد على عدد كبير من الآبار، والمستخدمة في الولايات المتحدة. وقد يستخدم حقن غاز الـ CO_2 لتحسين إنتاج الميثان من طبقات الفحم. وفي الحقيقة، يمتز غاز الـ CO_2 بشكل أقوى على سطوح الفحم أكثر من امتزاز الميثان. لذلك فإن حقن غاز الـ CO_2 يمكن أن ينتج ميثان طبقة الفحم، ويعزل غاز الـ CO_2 خلال امتزاز الفحم (White, 2005). وإذا ما التقط غاز الـ CO_2 من منشأة طاقة، مثلاً، تكون النتيجة انبعاثاً مخففاً لغاز الدفيئة. ولاتزال هذه التقانة مع ذلك في حالة قصور. وقد أعطت المشاريع الرائدة نتائج مختلطة.

الغاز المحجوز

يشير «الغاز المحجوز» إلى الغاز الذي وجد في الصخور ذات نفاذية منخفضة. وفيما لم تعرف بشكل رسمي، فإن مستوى النفاذية التي تشكل غازاً محجوزاً تكون أقل من 0,1 ملي دارسي (الوحدة المعتادة في قياس النفاذية). ويمكن أن تكون هذه الصخور احتياطياً تقليدياً (كربوناتية أو رملية) مع نفاذية منخفضة جداً، أو طَفَل نفطي (صخور غنية بالطين تعتبر غير نفّاذة). وفي الحالة الأخيرة، تعرف الصخور بـ «الطَفَل الغازي»، بشكل مشابه للطَفَل النفطي الذي نوقش في الفصل الثالث. ويعدّ كلاهما «صخور مصدر». ويعني هذا أن الصخور دفنت مع مواد عضوية. إذ إن الطَفَل الغازي دفن لفترة طويلة بما فيه الكفاية لكي تتحول المواد العضوية إلى نفط وغاز، في حين أن الطَفَل النفطي لم يدفن لفترة كافية لحدوث عمليات النضوج (التحول).

تعتبر هذه الاحتياطيات غير تقليدية لأن الغاز لا يتدفق بمعدلات اقتصادية من دون استخدام تقانات خاصة. وهناك طريقتان من بين الطرائق الأخرى يمكن أن تزودنا بالحل. تشمل إحداهما إحداث تشققات صنعية طويلة في الصخر عن طريق حقن الآبار بضغط عالٍ حتى تتشقق الصخور، وهي عملية تسمّى التشقق الهيدروليكي.

وأما الطريقة الأخرى فتشمل حفر آبار أفقية طويلة تتقاطع مع الشقوق الطبيعية. إننا بحاجة إلى تشققات، سواءً أكانت طبيعية أم صنعية، وذلك لتوفير ممر للغاز لكي يتدفق إلى الآبار. وتستخدم طرائق كهذه حالياً بشكل

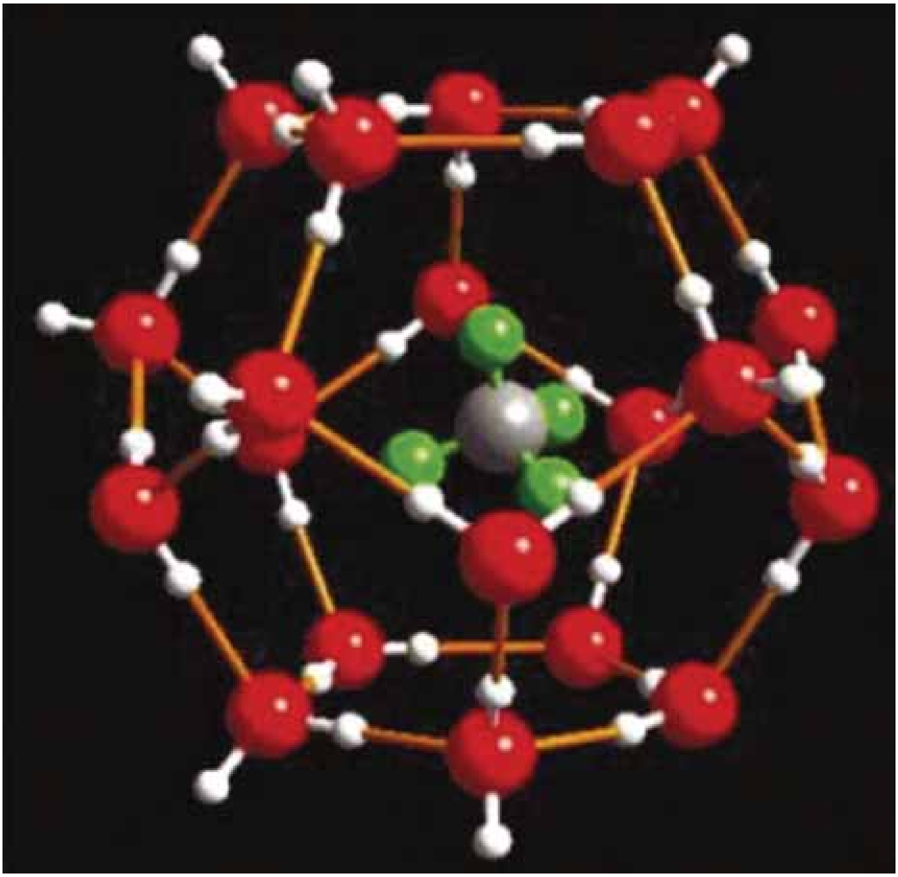
اقتصادي في الولايات المتحدة فقط، حيث خفضت تأثيرات حجم كلفة الحفر وعمليات التشقق الهيدروليكي إلى مستوى يكون فيه التطور قابلاً للتطبيق. وتمثل موارد الغاز المحجوز في الولايات المتحدة حوالى 15 تريليون متر مكعب (100 مليار مكافىء برميل نفطي)، تزود حالياً حوالى 15 في المئة من إنتاج الغاز للبلاد.

إن ما هو معروف عن وجود تشكيلات غاز محجوز كهذه في أماكن أخرى من العالم قليل جداً. إذ إن معظم الدول الأخرى التي لديها غاز تقليدي وفير لم تعتمد على التنقيب لاكتشاف الغاز المحجوز. ويتوقع الكثير من الجيولوجيين أن تحتوي أحواض رسوبية أخرى على تشكيلات مشابهة لحوض بارنت (Barnett) بتكساس للطَفَل النفطي (وهو في الأغلب أكبر احتياطي للغاز في الولايات المتحدة). ويمكن لتشكيلات كهذه أن تحتوي في أمكنة أخرى موارد مهمة. وبالتأكيد، فإن لتأثير حجم الحفر وكلفة التشقق في الولايات المتحدة، تأثير في المناطق الأخرى من العالم، وبخاصة في روسيا حيث كان إدخال النمط الأميركي من تقانة التشقق الهيدروليكي أحد العوامل وراء إحياء إنتاج النفط الروسي خلال السنوات الخمس الماضية.

هنا أيضاً، بما أن التقانة متوفرة بشكل كبير، فمن المرجح أن تقوم الأسواق المحلية بتطورات أكبر لنوع كهذا من الموارد. وإلى جانب وفرة موارد الغاز التقليدي، فإن إمكانيات احتياطيات الغاز غير التقليدي تؤكد أنه من المرجح أن يكون الاستثمار الكافي في البنية التحتية للنقل هو المتطلب الوحيد لنقل الإمدادات المستقبلية الكافية من الغاز.

هيدرات الميثان: موارد المستقبل الطويل الأمد؟

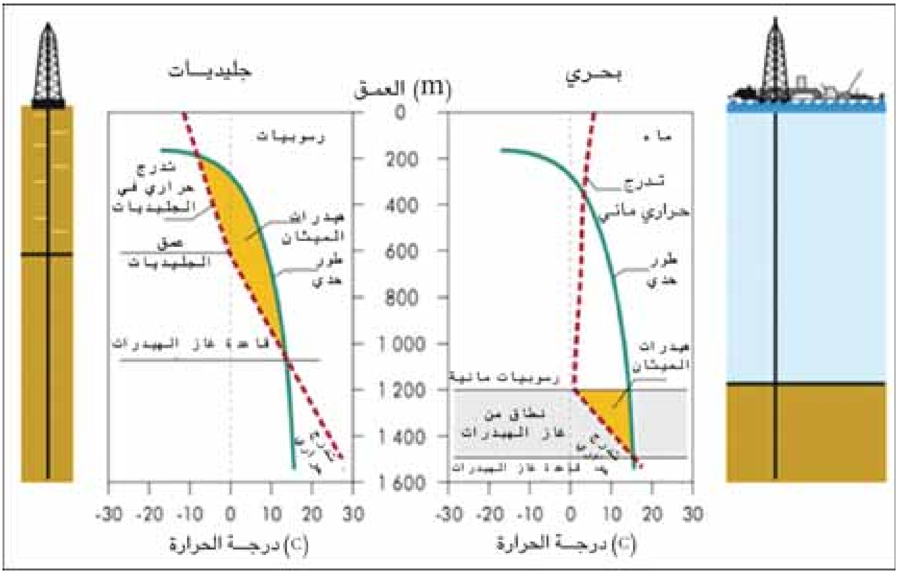
إن هيدرات الميثان مواد صلبة تشبه البلورات (الشكل 4 ـ 3) تتشكل عندما يمزج الميثان بالماء في درجة حرارة منخفضة وضغط معتدل. وبشكل عام، يشار إلى هذه المواد الصلبة كـ«مشبّك» لأن الغازات الأخرى مثل الإيتان، البروبان أو CO_2 تستطيع أيضاً تشكيل بلورات صلبة مشابهة عندما تمزج بالماء.



الشكل (4 ـ 3) : بنية هيدرات الميثان المشابهة للجليد، مع ذرة ميثان في قفص من ذرات الماء

تقدمة : S. Dallimore، الموارد الوطنية ـ كندا.

توجد هيدرات الميثان في قاع البحر أو في مناطق القطب الشمالي المتجمدة، عندما تكون درجة الحرارة والضغط ضمن (مجال وجود الهيدرات) ما هو معروض في الشكل 4 ـ 4. عادة ما تكون في طبقة جليدية في عمق بين 200 م إلى 1000م لرُسابة نفطية، وأما في قاع البحر فإنها تكون في عمق ما بين 500 م و1500 م من سطح الماء.



الشكل (4 ـ 4): سيطرة وجود الهيدرات بدلالة الضغط والحرارة

تقدمـة: S. Dallimore، الموارد الوطنية ـ كندا.

تُعتبر هذه الموارد الأكثر وفرة لغاز الهيدروكربون على الأرض. غير أن المعروف عن الكميات قليل جداً. وتتراوح التقديرات بين 1000 تريليون و10000000 تريليون متر مكعب تمثل ما بين الضعفين وعشرين ألف ضعف من حجم موارد الغاز التقليدي. وألمح ميلكوف (Milkov, 2004) في الدراسة الحالية أن مجمل الموارد قد تصل إلى 2500 تريليون متر مكعب. وتشير الخارطة في الشكل 5.4 إلى المكان الذي بدأ فيه وجود هيدرات الميثان (وذلك يعود إلى الجهود العلمية في المقام الأول مثل البرنامج الدولي لحفر المحيط).

ومع ذلك، فإن جزءاً كبيراً من مخزون قاع البحر قد يكون في التركيزات المنخفضة المنتشرة فوق مناطق كبيرة، ما يجعل منها هدفاً صعباً للاستثمار. وفي كل الأحوال، يبقى التحدي في كيفية إنتاجها بأمان وبشكل اقتصادي. وقد قامت عدة حكومات تدعم المشاريع الدولية ببحوث في هذا المجال.

متى ستصبح حقيقة؟ وقد حفزت الإمكانات الجبارة لغاز الهيدرات كمورد للطاقة، والمعرفة العلمية والتقنية المحدودة حول كيفية اكتشافه وإنتاجه، الاستثمار العام. والمشروع الأكبر هو في الأغلب مشروع الوزارة اليابانية

للاقتصاد والمبادلات والصناعة الذي يهدف على مدار 16 سنة (من 2000 ـ 2016) إلى تقويم شامل لإمكانية إنتاج الغاز الطبيعي من مخزونات هيدرات الغاز في قاع البحر أو في المناطق المتجمدة. ويوجد لدى الولايات المتحدة وكندا أيضاً عدد من المشاريع الإثباتية في طور التنفيذ، مثل مشروع مالك لاتحاد الولايات المتحدة، وكندا، واليابان (Malik project) الأكثر أهمية ويوضح إنتاج الغاز لعدة أيام في 2002 من احتياطيات طبقات الجليد في شمال كندا. وتهدف خطة وزارة الطاقة الوطنية للهيدرات لعام 1999 في الولايات المتحدة، كذلك التوصل إلى تقانة إنتاج لـ 2009 ـ 2014. وتشارك مختلف الشركات الصناعية في هذه المشاريع الإثباتية.

الشكل (4 ـ 5): خارطة وجود هيدرات الميثان المؤكد

تقدمة: S. Dallimore، الموارد الوطنية ـ كندا.

من رؤية تفاؤلية، يمكن لتقانة استثمار غاز الهيدرات بشكل تجاري أن تكون متاحة بحلول عام 2020. وقد يخلق هذا اختلافات كبيرة لتكهنات إمدادات الغاز المستقبلية. ومن الممكن أن يكون لها تأثير معتبر في اتجاهين رئيسين لجهود تكثير الغاز الطبيعي المسيّل، ألا وهما اليابان (في الماضي)

والولايات المتحدة (في المستقبل) اللتان ستتفاجآن بإمداد محلي على نطاق واسع. ومن غير المرجح أن يُشعَر بالتأثير بقوة قبل عام 2030، غير أن بإمكانه أن يبدأ التأثير في مناخ الاستثمار لمشاريع الغاز الطبيعي المسيّل وغاز الشرق الأوسط بحلول عام 2020.

وأما الرؤية الأكثر تشاؤماً فستضع نصب العين أن تجربة مشروع مالك (AAPG 2004) تشير حتى الآن إلى أن المخزونات القابلة للتطبيق الاقتصادي هي فقط المخزونات التي تحتوي على غاز حر تحت الهيدرات، وأننا مازلنا بحاجة إلى الابتكار إذا ما أردنا تطوير الاحتياطيات التي لا تحتوي على غاز حر بشكل اقتصادي. وبالتأكيد، فإننا نحتاج إلى مزيد من المشاريع المموّلة بشكل عام. ويقترح مشروع مالك مثلاً إجراء تجربة إنتاج طويل الأمد في عام 2006. وسيوفر عملٌ إضافيٌّ كهذا رؤية أكبر للدور الذي يمكن أن تؤديه هيدرات الميثان في أنظمة الطاقة في المستقبل.

الفصل الخامس

النقــل

من المقرر أن يزداد نقل الهيدروكربونات حول العالم بشكل كبير. وقد عرض سيناريو دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** أن جزءاً كبيراً من الطلب المتزايد على النفط خلال العقود القادمة سيلبى بإمدادات الشرق الأوسط التي يجري توزيعها على دول الـ IEA، الصين والهند واقتصاديات أخرى ناشئة. وهذا سيعني نقل كميات أكبر بكثير من النفط فوق مسافات كبيرة. وستتضاعف تجارة النفط ما بين الماطق من 31 مليون برميل يومياً في عام 2002 إلى 65 مليون برميل في عام 2020 (السيناريو المرجعي، IEA WEO-2004).

وسيطبق نفس الأمر في حالة الغاز. إذ إن الطلب المتزايد على الغاز في الكثير من الدول، المدعوم جزئياً بتأثير غاز الـ CO_2 المنخفض نسبياً، والمرتبط بتحرر أسواق الغاز وتطور تجارة الغاز الطبيعي المسيّل سيزيد بشكل كبير كمية الغاز المنقول فوق مسافات طويلة. وسوف تتضاعف تجارة ما بين المناطق ثلاثة أضعاف، ما سيزيد من مستواها في 2002 من 417 مليار متر مكعب إلى 1260 مليار متر مكعب في 2030 (سيناريو المرجعي، IEA WEO-2004).

ستخلق هذه الصورة المستقبلية عدة مشاكل تتعلق بالاختناقات في ممرات النقل البحري، وبالمخاوف الأمنية والبيئية وبقدرة الإنتاج وكفاية الكلفة. وسيكون هناك حاجة في كل هذه المناطق إلى اختراعات تقنية وتعاون دولي.

سلاسل النقل التقليدية: خطوط الأنابيب والغاز الطبيعي المسيّل

لقد تم استخدام نموذجَيّ النقل لعدة سنوات. وسيستمران بالسيطرة على السوق.

والتحديات الرئيسة الثلاثة لهذه السلاسل هي:

- تخفيض الكلفة.
- الحد من التأثير البيئي.
- السلامة وقبول الجمهور.

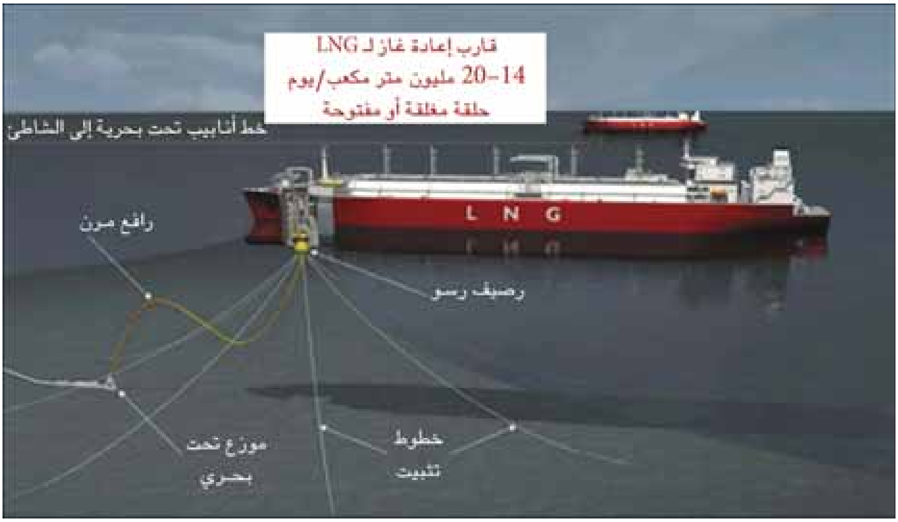
في حالة الغاز الطبيعي المسيّل، ستستمر تخفيضات الكلفة بالتوقف في جزء كبير من اقتصاديات المقياس في مصانع تسييل الغاز وفي ناقلات الغاز الطبيعي المسيّل. وقد انخفضت كلفة رأس المال لمصانع تسييل الغاز الطبيعي من 500 دولار أميركي للطن سنوياً في عام 1990 إلى حوالى 250 دولاراً أميركياً في عام 2004. ومن الممكن أن تتراجع بمثليها في العشرين سنة القادمة. وسيكون لتحسينات كفاءة الطاقة تأثير ايجابي في كلٍّ من الكلفة والأداء البيئي. وهناك عدة تقانات قيد الدراسة، وتشمل قطارات التسييل التي تقاد كهربائياً، والمبخرات الحاملة المقترحة، وضبط عملية الغليان المحسن واستخراج الطاقة المحسنة. مثلاً، إن استخدام «تقانة الغشاء» في ناقلات الغاز الطبيعي المسيّل (مادة جدار الناقلة مصنوعة من الإنفار/ بوليبوريثان Invar/polyurethane) خفضت بشكل كبير فقدان الطاقة في ناقلات الغاز الطبيعي المسيّل في السنوات الخمس الماضية. غير أنه مع ذلك، لم يبطئ الهبوط في كلفة رأس مال ناقلات الغاز الطبيعي المسيّل التي تراجعت في الأقل 25 في المئة منذ عام 1985. ومن المتوقع أن تنخفض إلى حوالى 25 في المئة أخرى في العشرين سنة القادمة. وسيدين التطور المفضل للكلفة بالكثير إلى مجيء سفن كبيرة ذات سعات أكثر من 200000 متر مكعب، مقارنة بالجيل الحالي للقوارب ذات سعة 138000 متر مكعب.

مع أن سجل السلامة للغاز الطبيعي المسيّل مدهش (حوالى 40000 رحلة بحرية من دون حوادث للغاز الطبيعي المسيّل في 40 سنة الماضية)، فإن القبول الشعبي الذي يعكس التوجس من تهديدات الإرهاب، يبقى مشكلة، بشكل خاص في الولايات المتحدة. ومن المرجح أن يثير هذا التطور منشآت طافية في البحار، أولاً من أجل

محطات التحويل إلى غاز، ومن ثم مصانع تسييل الغاز. وهناك تصاميم لتسهيلات كهذه، غير أنه رغم أن كلفتها لاتزال عالية، فإن أول منشأة لمحطات إعادة التحويل إلى غاز العائمة قبالة الساحل بدأت عملها في آذار/ مارس 2005 (الشكل 5 ـ 1).

لقد شهدت خطوط أنابيب الغاز تحسينات في كلٍّ من الكلفة والإنتاج. وقد مكّنها استخدام الفولاذ عالي الفعالية من العمل في ظل ضغط عالٍ جداً، وبذلك ازدادت الإنتاجية. ويمكن أن يسمح هذا الفولاذ كذلك بتقليل سماكة الأنبوب، وتخفيض الكلفة من جديد (الشكل 5 ـ 2).

من المتوقع أن يستمر هذا المنحى في الأعوام القادمة. وقد جلبت التطورات الحالية فولاذ X100 للاستخدام. أما فولاذ 120X والأنابيب المقواة المركبة فإنها قيد الدراسة (الشكل 5 ـ 3). في الوقت نفسه، فإن التقانات الحديثة لتطوير ولحم الأنابيب، بما في ذلك الحفر الأفقي (بدلاً من الخنادق) أو اللحام بالتردد العالي، سيساهم بشكل أكبر في تخفيضات الكلفة وتخفيف التأثير البيئي.

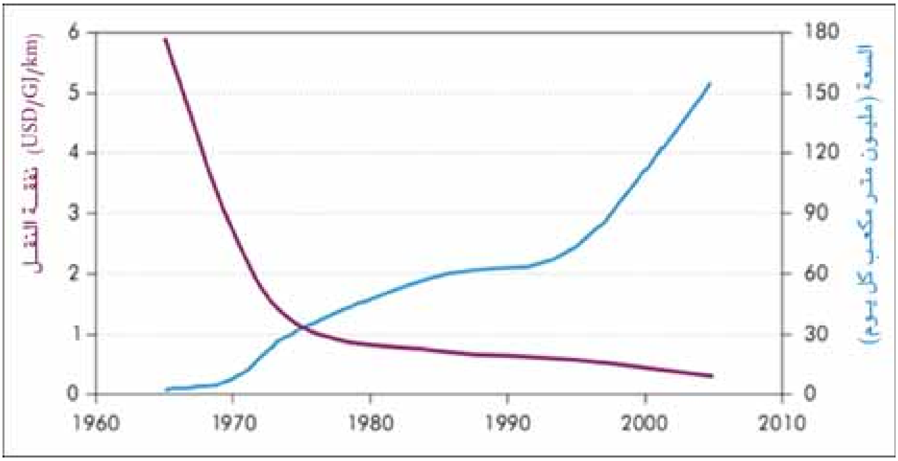


الشكل (5 ـ 1): تقانة جديدة لإعادة التحويل إلى غاز قبالة الساحل

تم إنتاجها بإذن من Excelerate Energy.

إن المساهمات في خفض انبعاث غاز الدفيئة سينجم عن التحسينات في أداء المكابس والتوربين. وتوفّر المكابس التي تعمل عادة بواسطة توربينات الغاز، الطاقة المطلوبة لنقل الغاز إلى الأسفل في خط الأنبوب. وفي الشبكات

الكبيرة لخطوط الأنابيب الممدودة إلى مسافات طويلة مثل خطوط الأنابيب الموجودة في روسيا، يستخدم حوالى 10 في المئة من الغاز الداخل إلى النظام لتشغيل المكابس. وستنجم المساهمة الأخرى في خفض غاز الدفيئة من التحسينات في إدارة تآكل الأنبوب، أو من أنظمة تحاشي التخريب للطرف الثالث، التي ستخفض الانبعاثات الهاربة من الميثان وتحسن السلامة.



الشكل (5 ـ 2): تخفيض في نفقات النقل بالأنابيب مع مرور الزمن

لاحظ أن المرجع يحتوي على أخطاء طبوغرافية فالمحور إلى اليمين يجب أن تكون وحداته دولاراً لكل جيكا جول (1GJ) لكل 1000 كم، وليس USD لكل جيكا جول لكل كم، كما أشير إليها. ويعادل جيكا جول الواحد (1GJ) من الغاز تقريباً 29 متراً مكعباً.

أعيد إنتاجها من (Gower, 2003) بإذن من اتحاد الغاز الدولي.

الشكل (5 ـ 3): خط أنبوب مدعم ومركب طور من قبل Transcanda

تقدمة: شركة نفط غاز فرنسا.

على الرغم من مشاريع تسييل الغاز الطبيعي وخطوط الأنابيب ستبقى التحسينات التقانية بحاجة إلى رأس مال كبير جداً. مثلاً، هناك مشروع منشأة شل لتسييل الغاز الطبيعي في سخالين (جزيرة روسية شمال اليابان) بقيمة عشرة مليارات دولار أميركي، وخط أنابيب غاز بلو ستريم (blue stream) الروسي - التركي الذي تم إتمامه مؤخراً بقيمة تبلغ أكثر من ثلاثة مليارات دولار أميركي. إن كلفة كبيرة كهذه ستحتاج باستمرار إلى التبرير في شكل إمدادات غاز محلي كبيرة من حقول الغاز العملاقة ووصولها إلى الأسواق الكبيرة إذا ما أرادت اقتصادية بشكل معقول.

من الممكن أن تنبع إحدى التطورات المحتملة لتحسين العائدات على رأس المال الكبير المنفَق الذي يمثله خط الأنابيب من قدوم خطوط أنابيب متعددة النواة التي يمكن من خلالها حمل منتوجات متعددة مختلفة في خطوط متوازية على المسار نفسه. مثلاً، بمقدور هذه الأنابيب أن تنقل في المستقبل غاز الـ CO_2 أو الهيدروجين، بالإضافة إلى الغاز الطبيعي. وهناك أسلوب آخر سريع التطور، وهو من نوع مختلف، يتضمن وضع ألياف اتصال ضوئية على طول مسارات خط الأنابيب لحمل البيانات التي لا تساهم في تحسين الاقتصاد فحسب، بل تساعد كذلك في تحسين عملية مراقبة خط الأنابيب.

بغضّ النظر عن هذه التطورات التقنية الواعدة، مازالت كميات كبيرة من موارد الغاز تفتقر إلى وسيلة للوصول إلى سلسلة نقل اقتصادية توصلها إلى السوق. ويسمى هذا الغاز عادة بالغاز «المحجوز»[1]. وقد يكون هذا المصطلح مصطلحاً مربكاً إذ إن كل الغاز يكون محجوزاً حتى إنشاء بنية تحتية ناقلة. وحين يناء هذه النية التحتية لايبقى الغاز محجوزاً. ومن المناسب أكثر أن نشير إلى موارد غاز تُعدّ عملية إحضارها إلى السوق غير اقتصادية في الوقت الراهن.

بالطبع تعتمد كمية هذا الغاز على أسعار الغاز الحالي، وبالمثل على البنية التحتية لكلٍّ من التقانة والنقل الراهنتين. ولذلك فإن هذه التقديرات عرضة للتغيير بمرور الزمن. وتتدرج حوالى 50 تريليون متر مكعب من موارد الغاز في

(1) تشمل هذه «الغاز الضعيف» وهو غاز يضم كمية كبيرة من غاز الـ CO_2 أو النيتروجين تمنعه أن يكون تجارياً بشكل مباشر، ومن أجله قد يكون تنظيم منشآت المعالجة لإزالة المكوِّنات غير المرغوبة التي لا تكون اقتصادية.

هذه الفئة حالياً (Cedigaz حددت في IEA WEO - 2001). وبذلك فإن التقانات الحديثة التي تمكّن هذا الغاز من الوصول إلى الأسواق حاسمة للإمداد المستقبلي.

الخيارات الناشئة

الغاز الطبيعي المضغوط (CNC)

في هذه التقانة لا يُسيّل الغاز بل يُضغط ببساطة ويُنقل في سفن مناسبة. ولدى وصوله، مكن إبطال الضغط من أجل استخدامه أو ضخه في خط أنابيب عالي الضغط. ويحتاج هذا النموذج من النقل إلى رأس مال أقل من تسييل الغاز الطبيعي بما أن منشآت الضغط أرخص من منشآت التسييل. ولا توجد ضرورة إلى محطة لتسييل الغاز حين وصوله. غير أن الكميات (لكمية ما من الغاز) تكون أكبر، ولذلك فإن كلفة النقل البحري ستكون أكبر. وبالنتيجة تعد هذه التقانة اقتصادية لنقل كميات صغيرة من الغاز لمسافات قصيرة.

ويتم حالياً بحث عدة مشاريع، غير أنه لا يوجد، حتى الآن، أي تطبيق تجاري على نطاق واسع.

مصنع تسييل غاز طبيعي صغير

ثمة اقتراح من أجل تصميم مصانع تسييل على نطاق صغير. وتستخدم في هذا التصميم ناقلات تسييل للغاز الطبيعي في اليابان والنرويج على نطاق صغير. ويُحمل مصنع التسييل أيضاً بصهاريج على الطريق. علماً أن استخدام هذا الأسلوب على نطاق واسع قد يؤدي إلى ظهور هواجس تتعلق بالسلامة. ومن الممكن أن يؤدي دمج هذه التقانات إلى جعل تطور تراكمات الغاز على نطاق ضيق لأسواق صغيرة أمراً اقتصادياً. وسيكون توفر محطات تسييل الغاز التي تتطور بسرعة لصالح هذا الأسلوب. علماً أنه لم يجر حتى الآن تجربة أي مشروع تجاري.

النقل كهيدرات الغاز

نوقش وجود هيدرات الغاز بشكل طبيعي كموارد في الفصل الرابع. وهيدرات الغاز هي أشكال صلبة تنتج عند مزج الماء والغاز في ضغط معتدل

ودرجة حرارة ضعيفة بشكل متوسط (انظر الشكل 4 ـ 4 في الفصل الرابع). وتكون درجة الحرارة هذه بالطبع أعلى بكثير من درجة حرارة الغاز المسيّل (160 درجة مئوية تحت الصفر). وحالما يتشكّل الصلب، يمكن نقله على شكل حبيبات، مثلاً عن طريق البر أو البحر. وعند وصوله نحتاج إلى منشآت مناسبة لإعادة تحويله إلى غاز. وأشارت الدراسات النظرية إلى أن ذلك ممكن تحقيقه، ويجب أن يكون اقتصادياً لتراكمات الغاز الصغيرة، حتى ولو كان نقلها لمسافات طويلة. ومع ذلك لم تثبت إلى الآن جدوى ذلك ودرجة السلامة.

تسييل الغاز ـ الصندوق 15

يعتمد تسييل الغاز على أسلوب مختلف لاستثمار احتياطيات الغاز الطبيعي، فبدلاً من نقلها إلى السوق، ينتج الغاز، ومن ثم يحوّل محلياً إلى سائل ذي قيمة تجارية. والأمثلة هنا هي: ميثانول (يستخدم حالياً كمادة كيميائية تجارية ووقود محتمل لخلايا وقود مستقبلي)، ديمثايليثر (dimethylether) (DME) ويستخدم حالياً كسائل مضغوط في عبوات (aerosols) ومن الممكن أن يصبح وقوداً للشاحنات، أو وقود ديزل للاستخدام المباشر كوقود لمحركات الديزل في الوقت المناسب.

الصندوق 15

أساسيات تسييل الغاز

تستخدم التقانة الحالية لتسييل الغاز معالجة متفاوتة لعملية فيشر ـ تروبش (Fischer-Tropsch) التي طُوّرت أصلاً في ألمانيا واستخدمت بكثرة في جنوب أفريقيا لإنتاج الغازولين من الفحم.

في الخطوة الأولى يحوّل الغاز الطبيعي إلى غاز اصطناعي (syngas)، أي مزيج من أكسيد الكربون والهيدروجين. ويمكن إنجاز ذلك إما بواسطة إعادة تشكيل البخار من الميثان (من خلال التفاعل $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$)، أو بواسطة الأكسدة الجزئية (من خلال التفاعل $CH_4 + 1/2O_2 \rightarrow CO + 2H_2$).

المسار الأول تفاعل ماص للحرارة بشكل كبير، يتطلب إدخالاً للطاقة، وينتج زيادة من الهيدروجين أكثر مما نحتاج إليه في الخطوة الثانية، في الأسفل. ويتطلب المسار الثاني مصنعاً لفصل أوكسجين مكلف. وفي بعض

العمليات، يدمج المساران في الاستخدام. وفي الخطوة التالية، يحوّل الغاز المصنّع إلى سلسلة طويلة من الهيدروكربونات شبيهة بوقود الديزل، باستخدام تحويل محفّز $CO + 2H_2 \rightarrow -CH_2- + H_2O$.

ويمكن استخدام محفزات مختلفة. وفي الحقيقة هنا تحدث التحسينات التقنية. وفي الوقت الراهن، فإن الاتجاه من الحديد إلى الكوبالت، ومواد أخرى ستظهر في المستقبل. وهذا تفاعل ناشر للحرارة، ينتج الكثير من الحرارة. ويعتمد ذلك على تصميم المنشأة، إذ يمكن استخدام بعض هذه الحرارة في عملية إعادة تشكيل البخار أو التزويد بالطاقة من أجل تطبيقات أخرى.

تنتج منشآت كبيرة عادة 3500 برميل لكل مليون متر مكعب من الغاز. وتكون كفاءة الطاقة حوالى 70 في المئة، لذلك تطلق العملية كميات كبيرة من غاز الـ CO_2 كمخرج لكلّ منشأة. وستكون كل منشأة كبيرة لتسييل الغاز الهدف الأول لاحتواء غاز الـ CO_2 وتخزينه.

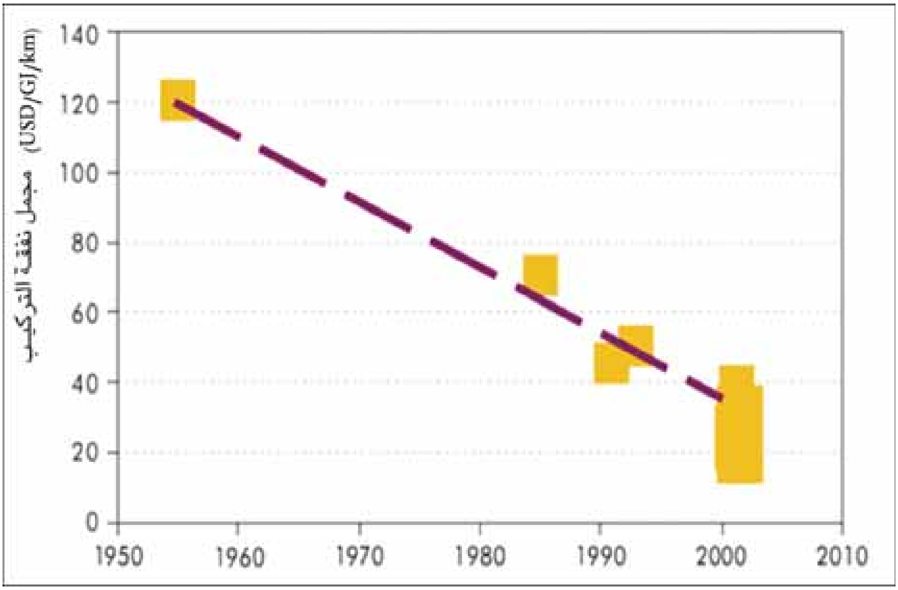
تعمل عدة مجموعات بحثية على تفاعلات ذات خطوة واحدة (مقابل الخطوتين (syngas + Fischer-Tropsch يمكن أن تكون أكثر كفاءة. وتشمل عادة إطلاق بعض البلازما. ولكن يبدو أن التطبيقات الصناعية تبقى بعيدة جداً عنها.

مسار آخر بديل يتمثل بإنتاج الميثانول من الميثان (عملية مؤكدة صناعياً بشكل جيد)، و(DME) من الميثانول (عملية مؤقتة لكنها متطورة بشكل جيد). ويمكن استخدام (DME) كبديل لغاز النفط المسيّل LPG) أي بوتان وبروبان)، أو حتى كبديل للديزل <http://www.aboutdme.org>.

لتسييل الغاز إمكانيات في ثلاثة أدوار:

■ أن يكون بديلاً للتسييل لاستثمار موارد الغاز الكبيرة التي حددت بعيداً عن الأسواق الكبيرة. وقد جرى التخطيط لعدة منشآت تسييل كبيرة في كلّ بلد أو أنها في طور البناء مع إمكانية إنتاج مبدئي تبلغ 30000 برميل يومياً من الديزل في عام 2006، وستصل إلى مئات الألاف من البراميل يومياً عام 2010. وتبلغ معدلات التحويل حوالى 300 متر مكعب من الغاز لكلّ برميل سائل ينتج.

وأظهرت التجربة في منشآت حول العالم أن اقتصاديات المقياس جعلت منشآت تسييل الغاز منافسة لمنشآت تسييل الغاز الطبيعي من الناحية الاقتصادية. غير أن تقلبات الأسعار النسبية للغاز والديزل، أو شروط عقود الإمدادات يمكن أن تخلق أفضلية لواحد على الآخر: يبادل الغاز من خلال عقود إمداد طويلة الأجل، بينما توجد سوق واحدة مطورة جيداً للديزل. وكما هو الحال مع تسييل الغاز الطبيعي، تحتاج تقانة تسييل الغاز إلى رأس مال كبير مع تكلفة مبدئية لمنشأة تصل طاقتها إلى حوالى 30000 دولار أميركي لكلّ برميل يومياً (شكل 5 ـ 4).



الشكل (5 ـ 4): تطور كلفة رأس المال لمنشآت تسييل الغاز بالدولار الأميركي لكل برميل يومياً

عرضت في مؤتمر IAEE في براغ 2003. أعيد إنتاجها بإذن من I. I. Rahmim, E-MetaVenture.

■ تقانة لاستثمار حقول الغاز «المحجوز» الصغيرة أو الغاز المرافق (انظر إلى التوهج الصندوق 16). إن منشآت التحويل الصغيرة ليست اقتصادية في الوقت الحاضر، غير أن عدة شركات تعمل على تصاميم جديدة لمنشآت تستطيع أن تغيّر ذلك (الشكل 5 ـ 5). وستتنافس منشآت كهذه تسييل الغاز الطبيعي أو تسييل الفحم، وستوفر امتيازات لسوق أكثر مرونة للإنتاج. وهناك

حاجة إلى إلى مشاريع تجريبية أكثر لهذه التقانات المختلفة للغاز المحجوز. ومن الممكن أن يكون لدفع تقانة تسييل الغاز على نطاق صغير تأثير إيجابي في كلفة إنتاج الوقود الحيوي، من خلال عمليات تسييل الكتل الحيوية (biomass-to-liquid) الشبيهة بتقانات تسييل الغاز وتسييل الفحم. وفي الحقيقة، فإن السبب الرئيس لبقاء الوقود الحيوي مكلفاً مقارنة بالوقود الأحفوري هو أن مدخلات المحاصيل بحاجة إلى أن تجمع من مساحة كبيرة لتغذية المنشآت الكبيرة. وستسهّل الكلفة الفعّالة والمنشآت الصغيرة تطوير وقود حيوي أرخص.

الشكل (5 ـ 5): نموذج أولي لمنشأة تسييل الغاز على نطاق ضيق

تقدمة: Alchem.

■ تقانة لإمداد «النفط غير التقليدي» المباشر على شكل وقود منقول مصفى. ومن الممكن أن يساهم تنويع الموارد في أمن إمدادات نقل الوقود. غير

أن معظم موارد الغاز المناسبة للتسييل على نطاق واسع موجودة في دول منظمة الأوبك في الشرق الأوسط. ويمكن اعتبار منشآت التسييل في أمن الإمدادات حجة ضعيفة، على الرغم من أن هذه الدول تملك انفتاحاً أكثر للشراكات المهتمة بمواردها من الغاز أكثر من مواردها النفطية. ويوجد لنقل الوقود من عمليات التسييل حسنات بيئية أخرى مقارنة بوقود الديزل الكلاسيكي حيث إنها تحتوي على كبريت قليل وكفاءة عالية.

تفترض دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004 أن يصل إنتاج الديزل من عمليات التسييل إلى 2,4 مليون برميل يومياً في عام 2030.

الصندوق 16

التوهج: حالة خاصة من الغاز المحجوز

يترافق الغاز المرافق دوماً مع إنتاج النفط. ذلك أن النفط أُحضر من ضغط عال في الاحتياطي إلى ضغط منخفض على السطح لنقله. وينبعث الغاز المنحل في السائل، كما هو الحال مع فتح زجاجة شمبانيا.

ويعبّر عن محتوى الغاز المرافق عادة على هيئة نسبة غاز ـ نفط (GOR)، وهي نسبة حجم الغاز بالنسبة إلى النفط حسب أحوال السطح. وتختلف نسب GOR بشكل كبير بين الاحتياطيات المختلفة حول العالم (يرتبط تقريباً مع الثقالة النوعية للنفط). إذ إنها تتراوح من حوالى 10 إلى عدة آلاف. وفي الحقيقة، فإن احتياطيات الهيدروكربون تحتوي على GOR أكبر تسمّى عادة حقول تكثيف الغاز بدلاً من حقول نفط، وتُستثمر من أجل الغاز الموجود فيها. وتتراوح معدلات الكتل ومعدلات محتوى الطاقة التابعة من 0.009 إلى خمسة ومن 0.01 إلى خمسة على التتالي.

تفضل شركات النفط استثمار هذا الغاز، ما يعني إما خدمة السوق المحلية بالقرب من مكان الإنتاج أو نقله إلى أسواق بعيدة. وغالباً، وبشكل خاص في المناطق البعيدة، لا توجد سوق كبيرة بما فيه الكفاية محلياً لخلق طلب على كمية كبيرة من الغاز، ولا تعتبر إجمالي كمية الغاز كافية لتبرير استثمار رأس مال في خط أنابيب، أو منشأة لتسييل الغاز الطبيعي وناقلات من أجل نقل الغاز لمسافة طويلة.

الخيار الثاني الأمثل يكون بإعادة ضخ الغاز إلى الاحتياطي. ويعتمد ذلك على مواصفات الاحتياطي، ويمكن أن يكون هذا جذاباً جداً أن يزيد الاستخراج الإجمالي للنفط. وفي حالات أخرى، يمكن أن يخفض الاستخراج بسبب الاختراق المبكر للغاز مما يؤدي إلى دوران الغاز. ومع كل هذا تُعدّ إعادة ضخ الغاز عملية مكلفة، إذ إن الغاز يحتاج إلى الانضغاط في ظل ضغط عالٍ يعادل الضغط الموجود في الاحتياطي. وإذا كان هناك القليل من الأمل أو لم يوجد بزيادة إنتاج النفط، فإن هذا الدرب لا يمكن تبريره اقتصادياً.

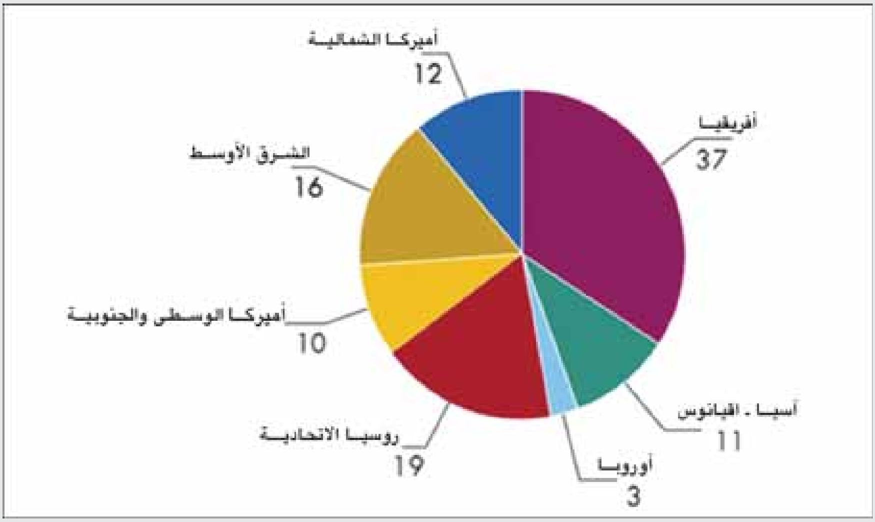
الخيار الوحيد المتبقي هو ببساطة أن تصريف الغاز عن طريق إطلاقه في الجو (شق فتحة). غير أن هذا الإجراء تحظره القوانين عادة أو يُتجنّب بسبب المخاوف المتعلقة بالسلامة، ولذلك يفضّل العاملون حرق الغاز في عملية تسمى «التوهج»، رغم أن أسلوب كهذا يشمل كلفة عالية ـ رأس مال للمحارق، طاقة للضخ والمزج، وكلفة صيانة المعدات ـ ما يكون لها تأثير مهم في اقتصاديات المشروع.

ستدرس شركة مان من أجل كل مشروع إنتاج نفط، هذه الخيارات وتختار الاقتصادي من بينها مع أخذ القوانين المحلية والأنظمة في الاعتبار. وليس من المستغرب أن يكون أسلوب التوهج (الشعلة) ممنوعاً في أماكن مثل سيبيريا أو نيجيريا، حيث إن السوق المحلية ليست كبيرة بشكل كاف لاستيعاب الغاز، ويكون إنفاق رأس المال المحتمل كبيراً جداً لتبرير بناء بنية نقل تحتية.

لا يعرف كمية الغاز المحروق عالمياً بشكل دقيق، غير أن تقويمات بعض الهيئات مثل مشروع تقليل التوهج لبنك العالم، (كما هو معروض في الشكل 5 ـ 6). وبالإضافة إلى أنه خسارة لوقود مفيد فإن التوهج يطلق كذلك غاز الـ CO_2 في الجو. علماً أن واحداً في المئة من انبعاث غاز الـ CO_2 الذي يصدره البشر مصدره التوهج، ولهذا أخذت عدة شركات ودول على عاتقها إجراءات من أجل تخفيف التوهج. مثلاً، استبعدت السعودية التوهج بشكل أساسي، وبدلاً من ذلك استخدمت الغاز من أجل إمدادات الطاقة المحلية. وأعلنت شركة بريتش بتروليوم أن المجموعة ألغت التوهج المستمر في كل

حقولها الكبيرة ما عدا حقل واحد. غير أن التقدم الأكبر سيعتمد على ظهور بعض التقانات التي نوقشت في الأعلى: GTL وMicro-LAN وCNG. ومثلاً في روسيا حيث نقل الغاز يعتبر احتكاراً وأسعار الغاز الداخلية منخفضة، فإن تقانات مثل تقانة تسييل الغاز يجب أن تكون جذابة لشركات النفط التي أسست من الآن سوق لإنتاج السوائل.

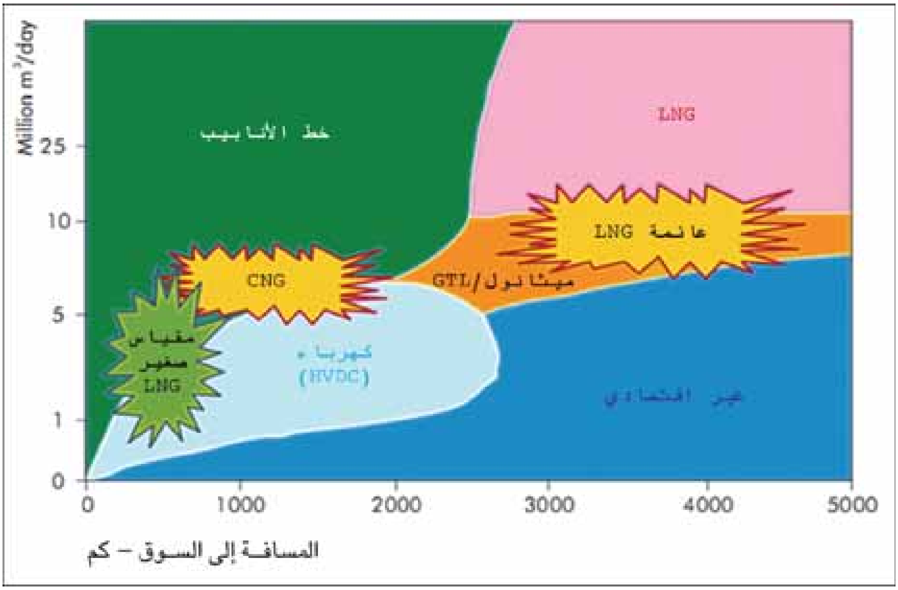
وقد أنشئت مؤخراً مبادرة ما بين الحكومات تسمّى «الميثان إلى الأسواق» وذلك للترويج لاستخدام التقانات المناسبة على وجه التحديد (<http://www.methanetomarkets.org>).



الشكل (5 ـ 6): تقويم كميات الغاز المتوهج (المشتعل) مقدراً بمليار متر مكعب في السنة

يكون مجمل العالم مقدر بـ 110 بليون متر مكعب (700 مليون boe).
بنك العالم ومعلومات Cedigaz.

الشكل 5 ـ 7 يلخّص الدور المحتمل لهذه التقانات في الاقتصاديات المستقبلية لنقل الغاز. إنها تؤكد الحاجة لتطور أكثر في التقانة لترخيص الاحتياطيات الصغيرة والمعزولة.



الشكل (5 ـ 7): تطبيقات تقانات نقل الغاز المختلفة

أعيد رسمها بالإذن من SINTEF.

اختناقات النقل البحري للنفط والغاز

كما هو موضح في الشكل 1 ـ 12 في الفصل الأول، فإن كمية كبيرة من النفط المنقول حول العالم اليوم يجب أن تمر من خلال عدد صغير من المضائق مثل مضيق البوسفور، ومضيق هرمز، ومضيق مالكا، وقناة السويس، ومضيق الدانمارك. ومع توقّع ازدياد الاعتماد على نفط الشرق الأوسط، فإن هذا سيكون الحال بشكل متزايد. وسينشأ جزء مهم من تجارة تسييل الغاز الطبيعي المتنامية في الشرق الأوسط، وهذا ما سيزيد من الاختناقات. ويكون بعض هذه الطرق المائية، وبشكل خاص البوسفور، مزدحماً وغالباً ما يشمل تأخيرات طويلة. وعموماً فإن المخاوف تزداد نتيجة تعرض هذه الاختناقات لتهديدات الإرهاب وعرقلة الإمدادات الرئيسة[2]. وتزداد كذلك مخاطر البيئة باتساع حركة المرور.

هناك حاجة إلى تطور التقانات لتخفيف هذه المخاطر بكل تأكيد.

(2) المرجع OECD 2003 يعطي نظرة شاملة مفيدة عن التهديدات الإرهابية لكلّ نظام النقل البحري.

وستضمن التطورات المحتملة تجاوز مضائق كهذه عن طريق خطوط أنابيب قصيرة المسافة. ومثال على ذلك مشروع خط أنابيب روسيا ـ بلغاريا ـ اليونان، الذي تمكّن من تجاوز مضيق البوسفور. ويمكن للتطورات المتوقعة في التحميل والتفريغ السريع مع بنية تحتية مينائية مطابقة، أن تمارس كذلك دوراً رئيساً. وبإمكان منشآت التحميل والتفريغ العائمة تسهيل عبور السفن الكبيرة إلى الموانئ الموجودة، وهكذا يمكن تخفيض العدد الإجمالي للسفن المتنقلة.

لا يقتصر منع كوارث النقل البحري على نقل النفط والغاز فقط. إذ سيبقى للتطور العام في تقانة المعلومات على متن السفن، وتقانة الاتصالات، وتقانات الاستشعار أثر كبير. وسيكون مهماً بشكل خاص:

- التعرف الآلي على السفن والعوائق.
- مراكز ضبط المرور، تعاون بشري ـ آلي معزز.
- الرقابة البيئية.
- الرقابة على متن السفينة.

وستتماشى تصاميم الناقلات المحسنة لتتحمل الكوارث وفق النماذج الجديدة. ولكن بما إن عمر السفينة يمتد عادة إلى حوالى 30 سنة، فإن التأثير الرئيس في الأسطول يكون بطيئاً نسبياً، حتى ولو قامت أنظمة منظمة البحار الدولية الحالية بتسريع تقاعد الناقلات ذات الهيكل الواحد. أخيراً، سيحسّن التقدم المستمر في الاستجابة للكوارث والطوارئ في كل العالم أداء جهود كهذه كاحتواء وإزالة بقع النفط، والتفريغ الطارئ وجر ناقلات النفط. وبشكل عام، هذا مجال يجب على الحكومات والتعاون الدولي أن يؤدوا فيه دوراً أساسياً.

الفصل السادس

البيئة والسلامة

الأثر البيئي

كما نوقش في الفصول السابقة فإن ازدياد الطلب المخطط له سيأخذ عمليات التنقيب عن النفط والغاز، وإنتاج هذه الهيدروكربونات، إلى ميادين وبيئات جديدة. وسيكون هناك ارتفاع عدد الآبار في المناطق الحالية وستتطور أنواع جديدة من الموارد. وسيكون سيناريو التغيير السريع هذا مقبولاً من الرأي العام فقط إذا اقترن بتقدم فعلي في الأداء البيئي. وما تبقى من النفط غير المكتشف، حسب التعريفات، فهو ماتبقى منه في الأمكنة التي لم يتم التنقيب فيها من قبل، ولابدّ أن هذه الأمكنة نائية وفي بيئات بدائية نسبياً. غير أنه على الصناعة أن تكون قادرة على إثبات، من دون لبس، أنه من الممكن التنقيب عن الهيدروكربونات واستخراجها بأدنى حد من التأثير.

من ناحية أخرى يجب القيام بمراقبة دائمة لانبعاثات الهواء، والتصريف في الماء (يشمل تصريف الحفر والماء المنتج)، والمواد الصلبة وغيرها من النفايات، وتلوث الأرض والمياه الجوفية، والتأثير البيئي، والتأثير الفيزيائي والمرئي للمنشآت والمرافق، واستعمال الأرض، واستعمال المواد الخام، والموارد الطبيعية، وكذلك إحداث الضجة وانبعاث الروائح.

إن الصناعة يقظة جيداً لهذا التحدي وهي تسعى بفعالية وراء التقانة الجيدة التي ستساعد في هذا المضمار. وإننا نرى هذه التطورات تماماً كحفر الآبار الصغيرة (التي تؤدي إلى منصات حفر صغيرة، بهدر أقل)، ومصادر طاقة لموقع بئر نظيف كخلايا الوقود، وإعادة ضخ النفايات المنتجة في التشكيلات

الجيولوجية أو أنظمة الحلقة المغلقة لسوائل الحفر. ويساعد التوجه إلى خفض كلفة الإنتاج كذلك على الحد من الانبعاثات، حيث إنه بالإمكان تعقّب أجزاء كبيرة من كلفة الإنتاج بالرجوع إلى استخدام الطاقة، ومن ثم انبعاثاتها المرافقة. وفي الحقيقة إن الخبرة والتحديات تحفز المهندسين إلى إيجاد حلول بيئية أكثر ودية. وغالباً ما يؤدي ذلك إلى وسائل ذات كلفة فعّالة والعكس بالعكس.

الشكل (6 ـ 1): نمط إنتاج النفط في حقبة العشرينيات في حقول نفط باكو، أذربيجان

لقد كان التطور معنوياً منذ أيام الاكتشافات الأولى في باكو (أذربيجان) في بداية القرن العشرين 1900 (الشكل 6 ـ 1). وهذا زمن بعيد جداً عن التطورات الحديثة التي حصلت في مناطق حساسة مثل وايتش فارم (Wytch Farm) في جنوب إنجلترا (الشكل 6 ـ 2 والصندوق 17).

وقد أظهرت المعلومات التي قدمتها شركات أعضاء في اتحاد منتجي النفط والغاز (OGP) (شكل 6 ـ 3) أنه يوجد تقدم مهم في مجالات البقع النفطية أو تصريف النفط في الماء، حيث كانت الصناعة تركز جهودها منذ عدة سنوات. ومع ذلك، تتطلب القضايا التي أصبحت مهمة مؤخراً، مثل انبعاث الغازات الدفيئة، عملاً أكثر. ويظهر أن الانبعاثات المبلّغ عنها آخذة في الازدياد. وتعكس

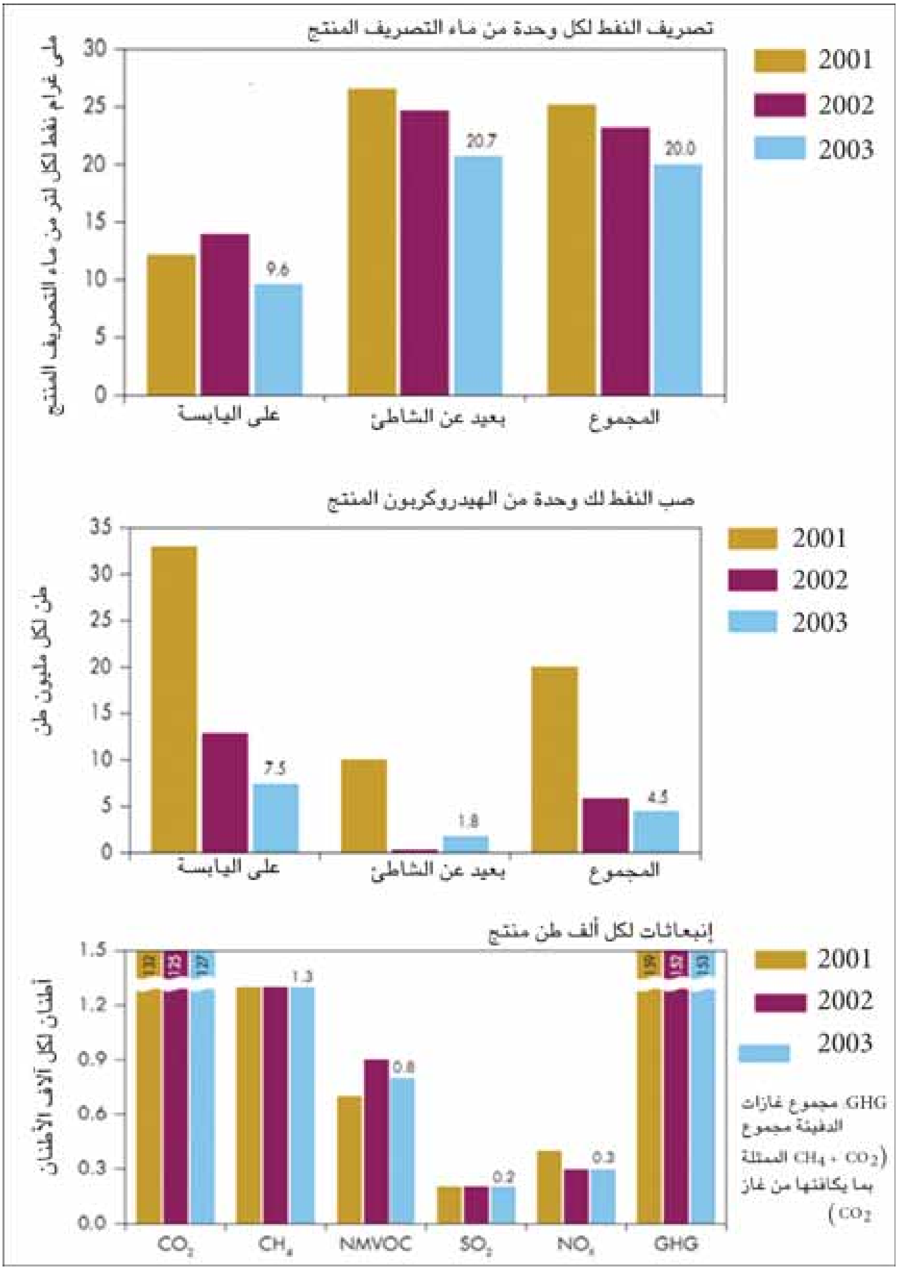
هذه الإفادات بعض التحسينات في عملية التبليغ، قبل دخول تدابير الإبلال حيّز التنفيذ. وتحد تقانات مثل الآبار الطويلة الأفقية أو متعددة الجوانب عدد الآبار التي نحتاج إلى حفرها وعدد مواقعها، وبذلك نحد من استخدام الأراضي (الشكل 6 ـ 4). وكذلك يحد حفر بئر ضيقة، أو الآبار ذات الحفرة الواحدة والأجهزة السطحية المحسنة أثر كل موقع حفر (شكل 6 ـ 5). وتحد تقانة ما تحت أعماق البحار من التأثير المرئي.

ومع ذلك، فغالباً ما تكون الحساسية البيئية غير ذات بال، وليست أمراً راسخاً بشكل كامل حتى الآن في تصميم كلّ مشروع. وهناك غالباً نقص في مهارة المتخصصين المطلوبة في شركات النفط والغاز.

في هذا المجال، يُعدّ استمرار الشراكة بين الشعب والحكومات والمنظمات البيئية والصناعة مهماً من أجل إحراز تقدم أكبر. مثلاً، هناك فهم محدود لتأثير تقانات المياه العميقة في البيئة البحرية العميقة، حيث إن البيئة نفسها لم تدرس بشكل مكثّف. وسيساعد التعاون الوثيق بين الصناعة والمنظمة العلمية في تحديد وتطبيق الحلول. ومثال على ذلك، أدّت انشطة النفط والغاز في بحر الشمال النرويجي إلى اكتشاف شُعب مرجانية في مياه باردة غير معروفة مسبقاً ويمكن حينها القيام بتدابير لحمايتها.

الشكل (6 ـ 2): منشآت إنتاج النفط في بداية القرن العشرين (1900) حقل وايتش فارم (Wytch Farm) **المملكة المتحدة**

تقدمة: BP.



الشكل (6 ـ 3): اتجاهات في مؤشرات التأثير البيني الرئيس

ملاحظة: ترمز NMVOC إلى المركبات العضوية المتبخرة من غير الميثان.

هذه الصور الثلاث أخذت من تقرير (OGP) 359: الأداء البيئي في صناعة الـ E&P

أعيد إنتاجها بإذن من اتحاد منتجي النفط والغاز. موجودة على الموقع الإلكتروني (<http://www.ogp.org.uk>).

الصندوق 17

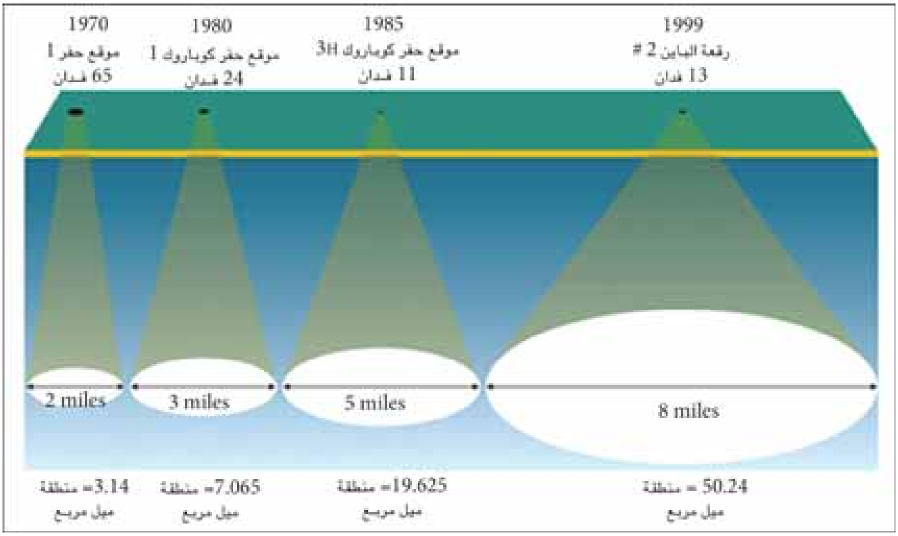
مثال على التطورات الحديثة : وايتش فارم

تقع احتياطيات وايتش فارم في عمق 1600 متر تحت ميناء بول (Poole Harbour) على الشاطئ الجنوبي من إنجلترا. ويوجد لمنطقة ميناء بول محيط بيئي حساس جداً، وهي محمية بواسطة اتفاقية رامسار (Ramsar) بين الحكومات بخصوص المستنقعات، وبواسطة تشريعات الاتحاد الأوروبي. وبالإضافة إلى أنها منطقة ذات مشاهد طبيعية خلابة، وصناعة سياحية مهمة. وتشمل منشآت شركة بريتش بتروليوم في وايتش فارم عدة آبار ومحطة تجمع مركزي. وقد حُفرت الآبار من الشاطئ باستخدام أحدث تقانات حفر الآبار الأفقية والوصول إلى احتياطي النفط على عمق 10 كم تحت قاع البحر من دون أي تأثير على البيئة البحرية.

وقد طُورت منشآت بريتش بتروليوم في وايتش فارم باتباع تقديرات بيئية شاملة. وأخذت بعين الاعتبار المسح البيئي والآثاري، بالإضافة إلى تقديرات التأثير المرئي، لتحديد إمكانية التخفيف من التأثير البيئي.وقد أُدخلت قياسات التخفيف منذ البداية في تركيب وعمل المنشأة. مثلاً، للتقليل من التأثير المرئي، فُرضت قيود على ارتفاعات وألوان للمنشأة والمعدات. وجرى كذلك موضعة الإضاءة وغلفت بدقة. ويوجد لدى شركة بريتش بتروليوم خطة إدارية للحفاظ على المناظر الطبيعية حول المواقع. وقد جرى الحد من الضجيج في أدنى مستوياته، ولذلك تستخدم تقانة الضجة المنخفضة والفحص الصوتي بشكل روتيني.

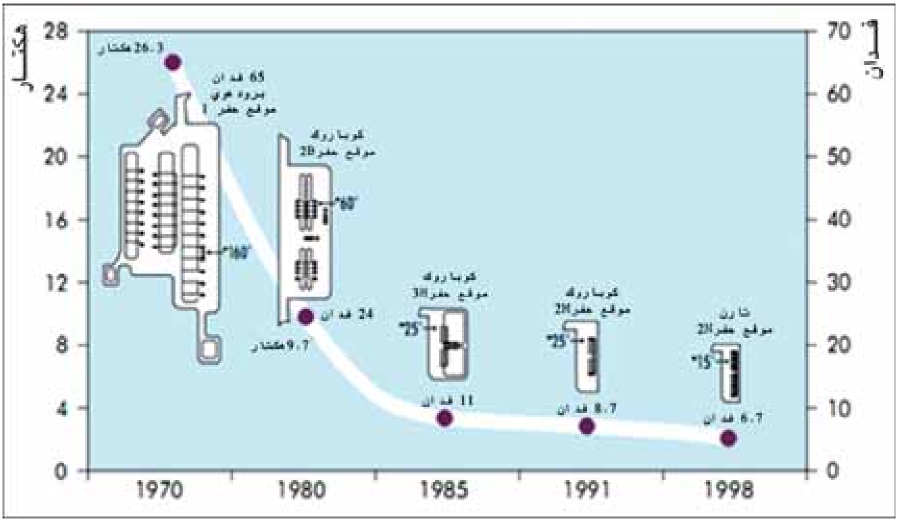
وقد صمّمت المواقع بطريقة تمنع تلوّث الأرض والمياه الجوفية. علماً أن سطح مواقع الآبار صلب مخطط بإغلاق محكم. وتصريف المياه قليل جداً إذ إن كل الماء المنتج، وأي مياه مطر ملوثة يعاد ضخها إلى الاحتياطي.

وعلاوة على الخطة الأصلية وتصميم الموقع، تخضع العمليات الجارية إلى تدقيق دائم للتأكد من امتثالها للمتطلبات الصارمة والالتزام البيئي الكامل من قبل كل شخص يعمل في وايتش فارم.



الشكل (6 ـ 4): استغلال كميات أكبر من الاحتياطيات النفطية مع أثر سطحي أصغر في ألاسكا

تقدمة: شركة ConocoPhilips © ConocoPhilip ـ ألاسكا. هذه الصورة عبارة عن نسخة من ConocoPhilips، ألاسكا ولا يمكن تحريرها أو طباعتها بدون إذن خطي من ConocoPhilips ـ ألاسكا.



الشكل (6 ـ 5): تخفيض آثار موقع الحفر في ألاسكا

تقدمة: شركة ConocoPhilips © ConocoPhilip ـ ألاسكا. هذه الصورة عبارة عن نسخة من ConocoPhilips، ألاسكا ولا يمكن تحريرها أو طباعتها بدون إذن خطي من ConocoPhilips ـ ألاسكا.

الصندوق 18
مثال عن التطورات الحديثة

خط أنبوب الغاز الأوروبي على اليابسة

يلبّي خط أنابيب الغاز النرويجي قسماً كبيراً من احتياجات أوروبا الغربية. إذ يُنقل الغاز من محطات بحر الشمال النرويجية عبر خط أنابيب بحري. وقد بدأ تصميمه في عام 1985. وتطلّب مسار خط الأنابيب الرّسو على شاطئ ساكسوني (Saxony) في ألمانيا.

إن المنطقة المختارة عبارة عن وسط بيئي حساس، مخصصة كمحمية وطنية بالإضافة إلى أنها محمية كمستنقعات تحظى باهتمام دولي في ظل اتفاقية رامسار التي تدعو إلى صيانة واستخدام عقلاني للمستنقعات ومواردها. إنها منطقة محمية خاصة بناء على توجيهات اللجنة الأوروبية وموقع التراث العالمي.

بعد تقويم مكثف للتأثير البيئي، اقترحت شركة ستات أويل تحديد مسار في خليج أكيومر إي (Accumer Ee) المدّي بين جزيرتي لانجيوغ (Langeoog) وبالتروم (Baltrum) يشمل نفقاً طوله 6,2 كم تحت السطح المدّي جرى اختياره من أجل عبور المحمية الوطنية. وقد بُني النفق عام 1994. وكان أطول نفق يُنشأ في هذا النوع من الطبقات الرملية الطينية. وقد كان البناء تحت السطح المدّي بشكل خاص عملية تجريبية تقنية، كما إنه كان تحدياً من منطلق السلامة والبيئة. وقد جرى مد خط أنابيب ثانٍ على الفور في النفق توقعاً لازدياد الطلب في المستقبل من أجل تخفيف التأثيرات البيئية الإضافية المستقبلية.

وقد سجّل برنامج رقابة بيئية شامل ابتلالاً سريعاً ضمن منطقة المنشآت. وكانت معظم التأثيرات التي أُفيد عنها في منطقة اليابسة ضمن التغيرات الطبيعية. وأُنشئ من أجل تعويض أي تأثير بيئي سلبي ذي أهمية مستعمرة عضوية تبلغ مساحتها 17 هكتاراً تشمل بركاً وكثباناً رملية قرب إمدين (Emden). وطُوّرت هذه المنطقة بعدئذٍ لتكون موئلاً لعدة أنواع من النباتات، والحشرات، والبرمائيات، والطيور النادرة المهددة بالانقراض. ورحّبت السلطات المحلية لحماية الطبيعة والمنظمات البيئية بإنشاء محمية كهذه، وهي تتمتع بالحماية نفسها الآن.

غاز الـ CO_2 وتغير المناخ

إن الحدّ من انبعاثات الغازات الدفيئة بدءاً بالتنقيب، وحتى الإنتاج ونقل الهيدروكربونات، أمر ضروري كعنصر أساسي في أي برنامج للحد من هذه الغازات. وفي الحقيقة، فإن ستة في المئة، في الأقل، من طاقة الوقود الأحفوري المنتجة تستخدم في عمليات الإنتاج نفسها (IEA, CCS, 2004، جدول 3 ـ 1). ولذلك فإن اكتساب الكفاءة يساعد على الحد من الانبعاثات الكونية بشكل كبير. وسيكون لذلك أثر كبير عندما تُطور الخيارات التقنية وتستخدم.

إن انبعاثات غاز الـ CO_2 عامل يجب الأخذ به في اختيار الموارد الجديدة وتطويرها. وكما شاهدنا في الفصول السابقة، فإن النفط الثقيل والبيتومين أكثر غنى بالكربون من النفط التقليدي. غير أن استخراجها يتطلب كذلك استخدام طاقة أكبر بكثير ـ كما يتطلب الطَفَل النفطي ـ، وينتج من ذلك انبعاثات أعلى من غاز الـ CO_2 إذا كان مصدر الطاقة وقوداً أحفورياً. وباستخدام التقانات الحالية، يكون لعمليات تسييل الغاز معدل كفاءة طاقة وانبعاثات غاز الـ CO_2 محدودة أيضاً.

وكما هو الحال مع الكثير من التحديات، فإن هناك فرصاً يمكن استثمارها إضافة إلى كونها جزءاً من المشكلة، إذ إن بإمكان أعلى سلسلة صناعة النفط والغاز أن تكون جزءاً من الحل أيضاً. ويمكن استخدام غاز الـ CO_2 لاستخراج النفط أو الغاز المحسن في طبقات الفحم. ويمكن كذلك استخدام احتياطيات النفط والغاز المستنفذة من أجل تخزين غاز الـ CO_2 لمدة طويلة. وبشكل عام، فإن تقانات النفط والغاز الراسخة هي ما نحتاج إلى تطبيقه بالضبط لتخزين غاز الـ CO_2 في تشكيلات جيولوجية. علماً أن التقانات المطلوبة متوفرة في أكثرها ضمن الاستثمارات الخاصة في الصناعة. إلا أن المشكلة الرئيسة التي يجب تحديدها تتعلق بمراقبة مواقع تخزين غاز الـ CO_2 لفترة طويلة. وستكون الشراكات مع المعاهد الحكومية مطلوبة إذا ما أردنا أن تكون المراقبة دائمة وسليمة.

الأمن والسلامة

بما إن النفط والغاز موجودان غالباً في أماكن بعيدة غير مأهولة أو أنهما يستثمران عن بعد، فإن الكثير من ممتلكات النفط والغاز عرضة لهجمات إرهابية

محتملة. ولذلك تطبّق الآن في كثير من المواقع تدابير سلامة تقليدية تشبه التدابير المستخدمة في المنشآت الأخرى. ومع ذلك فإن التجديد مطلوب للقيام بحماية أفضل للممتلكات أثناء تصميم المنشآت نفسها. وبإعطاء الاهتمام بمنشآت تسييل الغاز الطبيعي مثلاً، خصوصاً في الولايات المتحدة (Sandia, 2004)، فإنه يجري بحث تقانات احتواء نيران الغاز الطبيعي وتطويرها وتطبيقها بسرعة. ويعد دعم الحكومة في هذا المجال مهماً، **أولاً**، لأن التهديدات عموماً أكبر من قدرة الشركات الخاصة و**ثانياً**، لأن المهارات المطلوبة والخبرات غالباً ما تتوفر ضمن المؤسسات الحكومية.

من اعتبارات للسلامة الأخرى تتطلب تطوراً تقنياً يتمثّل بمقاومة الأخطار الطبيعية. إذ غالباً ما تعتمد احتياطات سلامة المنشأة على الأخطار التاريخية، وهكذا تُصمم المنشآت لدرء مخاطر العواصف أو الزلازل أو الانزلاقات الأرضية التي تحدث مرة كل مئة عام. ومع ذلك فإن تغيرات المناخ قد تؤدي إلى مخاطر طبيعية متزايدة، غير أنها خارج المعايير المعتمدة. وهذه ليست بالطبع مشكلة تؤثر في منشآت النفط والغاز فحسب، بل من الواضح أنها تتطلب تعاوناً جدياً من الصناعة والسلطات المشرّعة.

الفصل السابع

وضع القطار على السكة

ناقشنا في الفصول السابقة من أين سيحصل العالم على النفط والغاز في السنوات الخمس والعشرين القادمة وما بعد ذلك. وقد اطلعنا على التقانات التي سنحتاج إليها لضمان أمن الإمداد، وعلى نطاق السعر الذي يمكن تطبيقها من خلاله. لقد كان عدة تقانات من هذه التقانات رائدة في الصناعة الخاصة، ووجّهت برامج حكومية القليل منها. وإن لدى الصناعة سجلاً حافلاً في تحريك التقانات الجديدة التي وفّرت إمداداً مستمراً منخفض الكلفة من النفط والغاز حتى اليوم. وباعتماد هذا المسار المرتبط بقائمة التقانات الواعدة التي نوقشت في هذا الكتاب، فستتوفر جميع الأسباب لجعلك متفائلاً بأن عملية التطور ستستمر مع حد أدنى من تدخل السلطات العامة.

وكما أشير في الفصول السابقة إلى أنه لا توجد شحة في الهيدروكربونات في الأرض، إلا أن المشكلة الأساسية تتمثّل في سعر النفط الذي سيجعل هذه الموارد المتنوعة متوفرة. وقد يكون هذا سؤال تصعب الإجابة عنه لأن ذلك يعني التنبؤ بالتأثير المتوقع من تقانات المستقبل.

أخيراً سيتنافس النفط والغاز مع موارد طاقة بديلة أخرى، سواء أكانت أحفورية (فحم) أم متجددة. ومن الضروري أن نفهم كيف ستساهم هذه البدائل المختلفة في تلبية احتياجاتنا من الطاقة في المستقبل. أما في حالة الهيدروكربونات، فإن فكرة أن يؤدي أي من الموارد دوراً مهماً أمر حاسم في وضع أولويات الاستثمار والبحث والتطوير. وكما نوقش في الفصل الثالث، فإن النفط الثقيل غير التقليدي سينافس في أسواق نقل المحروقات السائلة مع

تقانات تسييل الغاز وتسييل الفحم[1]. وسيتنافس الوقود الأحفوري بدوره، في عالم مقيّد بانبعاثات غاز الـ CO_2، مع تقانات الوقود المستحدثة مثل الوقود الحيوي أو الهيدروجين (المولّد من الطاقات الرئيسة الخالية من CO_2) بالإضافة إلى التقانات التي يجري السعي من خلالها إلى تطوير كفاءة الطاقة.

اتجاهات نمذجة تقانة المستقبل

بدأت الـ IEA مؤخراً بدراسة تحليلية لهذه الأسئلة إذ إنها تتعلق بمحروقات النقل. وبما إن النقل يمثل جزءاً كبيراً من الطلب المستقبلي على النفط، فإن هذه خطوة مهمة إلى الأمام. وهذا العمل هو جزء من مشروع المنظور التقني الطاقوي الخاص بالـ IEA. وبالاعتماد على طرائق نمذجة الـ MARKAL، فإن هذا المشروع يتطور ويستخدم نموذج تقانة طاقة كونية (ETP) (IEA CCS-2004)، من أجل البحث في كيفية تأثير التقانات المختلفة في نظام الطاقة العالمي في المدى البعيد. ويتضمن النموذج عدة مئات من التقانات التي تغطي إمدادات الطاقة وتوليد الكهرباء وكل متطلبات القطاعات في كل المناطق الـ 15 الممثلة. وحددت الحسابات مزيج التقانات والوقود الذي من الممكن أن يقلّل كلفة نظام الطاقة العالمي في حالة ما.

ويمكن لكلفة مختلف الخيارات في النموذج أن توازن ضد انبعاثات غاز الـ CO_2، آخذين في الاعتبار انبعاثات كامل سلسلة الوقود من البئر إلى النقل (well to wheels)، أو بافتراض أن الانبعاثات من عمليات الإنتاج التقطت وخُزّنت في تشكيلات جيولوجية. ويمكن اعتبار التخفيضات في انبعاثات غاز الـ CO_2 قيمة اقتصادية تعكس صرامة سياسات تخفيف حدة تغير المناخ: كلما كانت السياسات أكثر صرامة كانت القيمة أعلى.

ويفحص النموذج إلى الفترة حتى 2050. وهناك حاجة إلى هذا الإطار الزمني لأنه يمكن توقع التغيرات المهمة في مزج الإمدادات بين التقانات المختلفة فقط بعد 2030. وأما الفترة حتى 2030 فقد جُمّدت بكاملها بسبب الاستثمارات الحالية طويلة الأمد. وقد جرى تحليل حالات عديدة بالاعتماد على افتراضات مختلفة آخذة بعين الاعتبار سياسات التعامل مع غاز الـ CO_2 أو على تطورات الكلفة المستقبلية لبعض التقانات.

(1) إن مناقشة تقانة الـ CTL وإمكانية تطويرها خارج إطار هذا الكتاب، انظر على سبيل المثال (Steynberg, 2004).

تقترح النتائج الأولية (Gielen, 2005) أن النفط والغاز سيستمران بالسيطرة على سوق وقود النقل في الأقل حتى عام 2050، غير أنه من الممكن أن تبدأ مساهمتهما بالتراجع بعد 2030 لأن المحروقات البديلة ستبدأ باكتساب حصة أكبر في السوق. وسيبدأ الوقود المسيّل من الفحم والايثانول، في عالم غير مقيد بغاز الـ CO_2، بالحلول محل النفط. وأما في العالم الحالي المقيد بغاز الـ CO_2، فقد ينخفض الطلب على الوقود المتبقي إلى ما بين 25 و30 في المئة نتيجة الكفاءة المحسنة. وهناك تغيرات كبيرة في كيفية توزيع الطلب على الوقود المتبقي: الحصص الأصغر من أجل منتوجات النفط ومن أجل الوقود المصنّع من الفحم والغاز، مع حصة أكبر من الوقود الحيوي. ويمكن للهيدروجين ضمن افتراضات تقانية محددة أن يؤدي دوراً متنامياً. وسيجري عرض نقاش كامل لهذه الأسئلة في مطبوعات الـ IEA القادمة (IEA-Hydrogen, 2005).

إن عنصراً مهماً في أي ممارسة منمذجة من هذا النوع ستكون مجرد تخمين لتأثير التقانة في الكلفة المستقبلية لمختلف الوقود. وفي حال النفط، يجري فحص العامل الرئيس في الأسفل.

تأثير التقانة في إمدادات المستقبل

يُناقش في الصندوق 19 مختلف «منحنيات الكلفة» المقررة، أو مستويات أسعار النفط التي يمكن للصناعة الإضافة على الاحتياطي المؤكد. إن منحنيات كهذه تتضمن غالباً افتراضات غامضة أو غير واضحة حول تأثير تطور التقانة في المستقبل. ويمكننا باعتبار النقاش في الفصول السابقة، مع المداخلات الكثيرة من الخبراء الصناعيين، أن نعرض كمية الموارد التي يمكن أن تحوّل إلى احتياطي بدلالة أسعار النفط، آخذين بالحسبان التقدم التقاني المرجح. وسنركز على النفط الذي يمثّل استخراجه الكلفة المسيطرة، وليس على الغاز حيث كلفة النقل تسود الاقتصاديات. وقد جرى دمج الافتراضات الآتية.

- إن كل نفط الشرق الأوسط (المؤكد والذي لا يزال بحاجة إلى التأكيد أو التنقيب) نفط رخيص.
- يبلغ سعر البرميل من الاحتياطات المؤكدة الأخرى أقل من 20 دولاراً بالتعريف. وسيكلف جزء جيد من «نمو الاحتياطي» والنفط غير المكتشف أقل من 25 دولاراً للبرميل طبقاً للتطور التقني.
- ستمنح المياه العميقة 100 مليار برميل بكلفة ما بين 20 و35 دولاراً للبرميل.

- يمكن لمناطق القطب الشمالي إعطاء 200 مليار برميل بكلفة ما بين 20 و60 دولاراً للبرميل.

- ستكون مساهمة الاحتياطيات العميقة جداً صغيرة، ومكلفة نسبياً بالنسبة إلى النفط (إذ إن معظمها يحتوي على غاز).

- يمكن لتقانة الاستخراج المكثّف للنفط إعطاء 300 مليار برميل أكثر مما تحتويه تقديرات هيئة المسح الجيولوجي الأميركية الخاصة بنمو احتياط، غير أنها بعضها سيبقى مكلفاً جداً.

- إن للنفط الثقيل غير التقليدي إمكانية كبيرة (حوالى 1000 مليار برميل موزّعة على احتياطيات في كندا، وفنزويلا، ودول أخرى) تبلغ بين 20 و40 دولاراً للبرميل، تتضمن كلفة غاز الـ CO_2 وكلفة التلطيف البيئي.

- بدأ الطَفَل النفطي يصبح اقتصادياً، أي 25 دولاراً أميركياً للبرميل. ومن الممكن استثمار جزء مهم من الموارد بأقل من 70 دولاراً أميركياً للبرميل، تتضمن كلفة غاز الـ CO_2 وكلفة التلطيف البيئي.

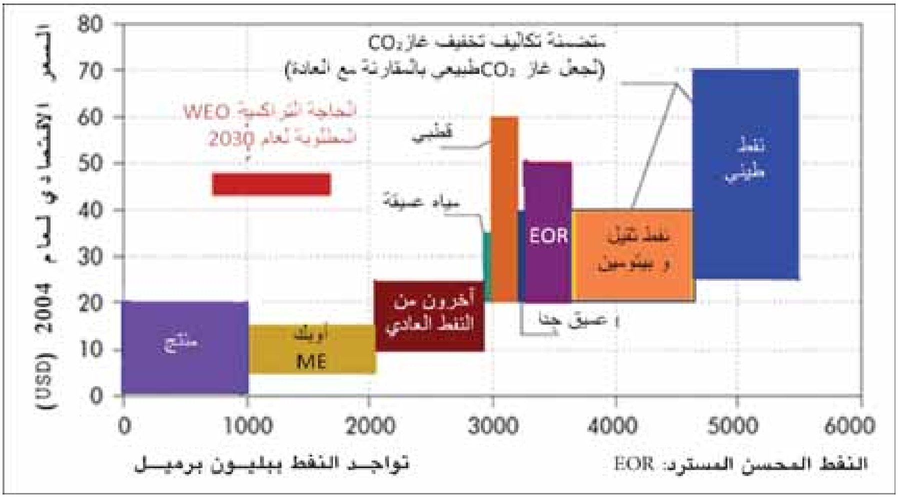
لقد وضحت هذه التقديرات في الشكلين (7 ـ 1) و(7 ـ 2). في الشكل 7 ـ 1 يعرض المحور Y سعر النفط (برنت) الذي يصبح فيه الاستثمار لمختلف كميات الموارد خياراً اقتصاديا، آخذين بالحسبان كلفة احتواء وتخزين غاز الـ CO_2 المنتج خلال استخراج النفط غير التقليدي. بينما تظهر الموارد التراكمية على المحور X. وعلى نقيض منحنيات الكلفة التقليدية، يسهّل هذا العرض التواصل مع نوع الموارد، ويسهّل بذلك التواصل مع مختلف التقانات المطلوبة. ويشير بالإضافة إلى عرض كهذا ليس دقيقاً علمياً وأنه لا يمكن عرض إلا مجموعة من الكلفة. وقد أبرزت دورية **استشراف مستقبل الطاقة العالمية** لعام 2004 الطلب النفطي التراكمي المتوقع ما بين 2003 و2030، ما يزوّدنا بمقياس مهم لمستويات النفط المتوفر.

وعرض الشكل (7 ـ 2) البيانات نفسها، ولكن بطريقة مختلفة، فيعرض على المحور x سعر النفط، وعلى المحور Y الموارد التراكمية القابلة للاستثمار بشكل اقتصادي. وحالياً، تعتمد معظم الشركات في قرارات استثمارها على الأسعار بعيدة الأمد التي تبلغ ما بين 20 و25 دولاراً أميركياً لكلّ برميل. ويفترض الشكل أن تقبل السعر بعيدة الأمد (30 دولاراً إلى 35 دولاراً) لكل برميل سيكون له تأثير كبير في احتياطيات المستقبل.

من المهم التأكيد أنه إذا أصبحت الموارد اقتصادية في السعر المعطى، ما يسمح بعودة الاستثمار العادي، فليس بالضرورة أن يعني هذا أنها ستستثمر. إذ إن هناك عدة عوامل مثل الطلب، ومنافسة استثمارات جذابة أكثر، والأنظمة، والضرائب، وإطار العمل والملكية، ووسائل الوصول إلى الموارد، أو عوامل جيوبوليتكية، ما يعني أن مستويات الأسعار المشار إليها ضرورية، غير أنها ليست كافية لوحدها.

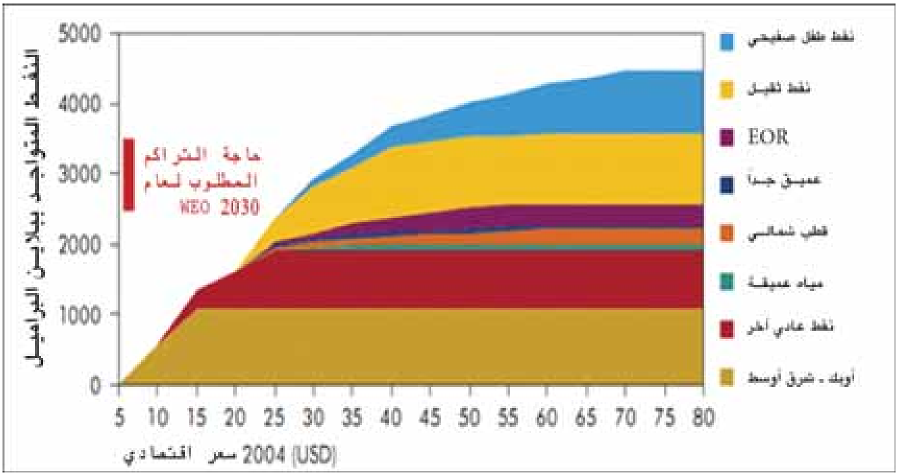
هذه الأشكال مبنية كذلك على الأسعار المدعمة طويلة الأمد، وليس على أسعار ذروة مؤقتة، تفترض كلفة بعيدة الأمد للمعدات والخدمات. وتمر الكلفة الأخيرة أيضاً بدورات ازدادت بشكل كبير بين عامي 2003 و2005؛ وتتبنّى الرؤى أن آليات السوق طويلة الأمد ستزيل القيود في سلسلة الإمداد.

هناك اعتراض آخر على الشكلين (7 ـ 1) و(7 ـ 2)، كما نوقش في الأعلى، إذ قد تصبح تقانات تسييل الغاز وتسييل الفحم جذابة أكثر من بعض الموارد المعروضة في الشكلين. وتعتمد موارد ذات إمكانية كبيرة جداً لمنتوجات النفط السائل على تسييل الفحم. وتدل المؤشرات أن منشآت المناجم السطحية اقتصادية اليوم بأسعار نفط تتراوح بين 30 إلى 60 دولاراً للبرميل بالاعتماد على الموقع.



الشكل (7 ـ 1): منحنى تكلفة النفط، يتضمن التطور التقني: توفر موارد النفط بدلالة السعر الاقتصادي

المصدر: IEA.



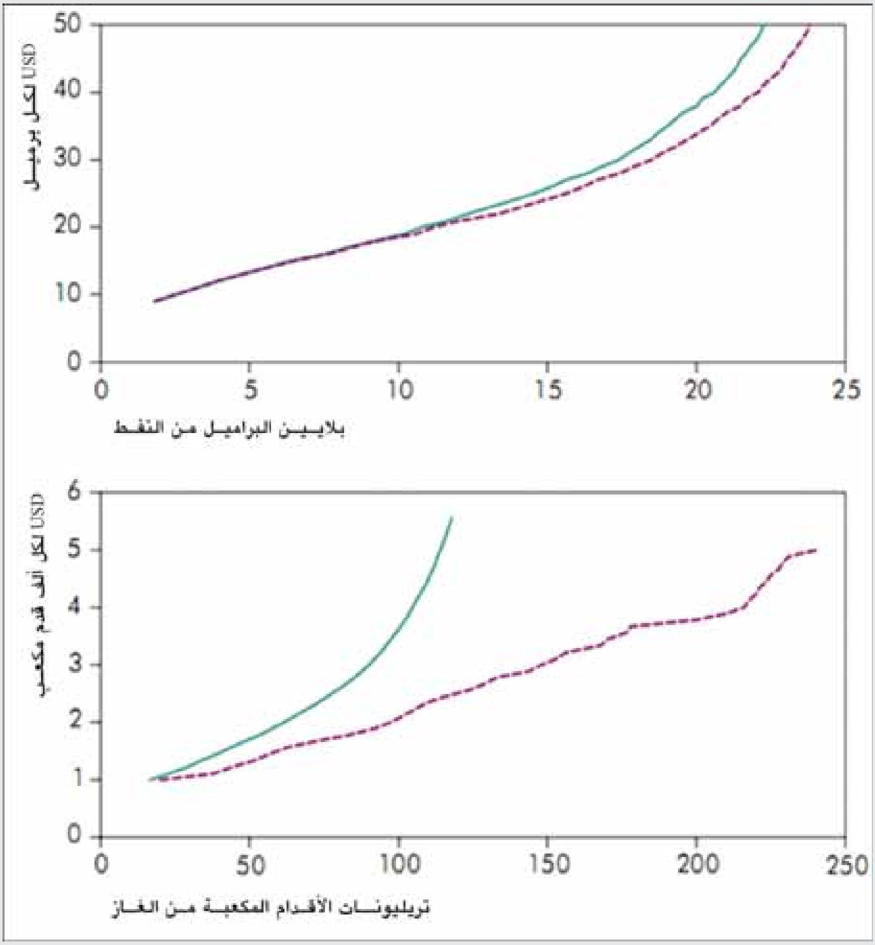
الشكل (7 ـ 2): منحنى تكلفة النفط، عرض بديل المعطيات نفسها في شكل 7 ـ 1

المصدر: IEA.

الصندوق 19
منحنيات الكلفة ومنحنيات التعلم

إذا لم يكن هناك نقص في الهيدروكربونات في الأرض، وإذا كان السؤال الرئيس يتعلق بأسعار النفط التي ستتوفر فيها كل الموارد المختلفة، كيف نستطيع الإجابة عن هذا السؤال؟ كيف نستطيع التوقع بتأثير تقانات المستقبل؟ تحتاج كل النماذج الاقتصادية المستخدمة في عمل المشاريع ـ وبشكل ملاحظ نموذج ETP المذكور في أوائل هذا الفصل ـ لوضع فرضيات حول كلفة أداء تقانات المستقبل. ويُعطي هذا الصندوق نظرة خاطفة على العمل المنشور ذي الصلة بهذا الموضوع. وقد جرت مناقشة الأساليب في هذه المادة المطبوعة استناداً إلى منحنيات الكلفة و/أو منحنيات معرفة (Cost and/or learning).

مثلاً في عام 1995 عرض تقدير هيئة المسح الجيولوجي الأميركية لموارد النفط والغاز فيها «عوامل الكلفة الزائدة»، تقويماً «للموارد التي تستطيع الصناعة إضافتها إلى الاحتياطي المؤكد» بدلالة الكلفة الهامشية.



الشكل (7 ـ 3): الكلفة المتزايدة لاكتشاف وتطوير وإنتاج موارد نفط وغاز جديدة في الولايات المتحدة

الخطوط المتصلة هي للموارد التقليدية، وأما المقطعة فهي لإجمالي التقليدي وغير التقليدي. ومع أنها ليست محددة في المطبوعات، فإن الوحدات في الأغلب مقدّرة بالدولار الأميركي لعام 1994.
يعادل الـ 1000 قدم مكعب تقريباً 28 متراً مكعباً.
أُعيد إنتاجها من هيئة المسح الجيولوجي الأميركية 1995.

جرى الحصول على منحنيات الشكل 7 ـ 3 من التوزع المحتمل للموارد في مواقع مختلفة، بدلالة العمق، مقترنة بتقويمات الخبراء المختلفة للكلفة الحالية لاكتشاف هذه الموارد وتطوير إنتاجها. ولذلك تمثّل تلك

المنحنيات لقطة خاطفة لنقطة واحدة كل مرّة بافتراض تقانة 1994 من دون تخفيض كلفة خلال تعلم التقانة اللاحق.

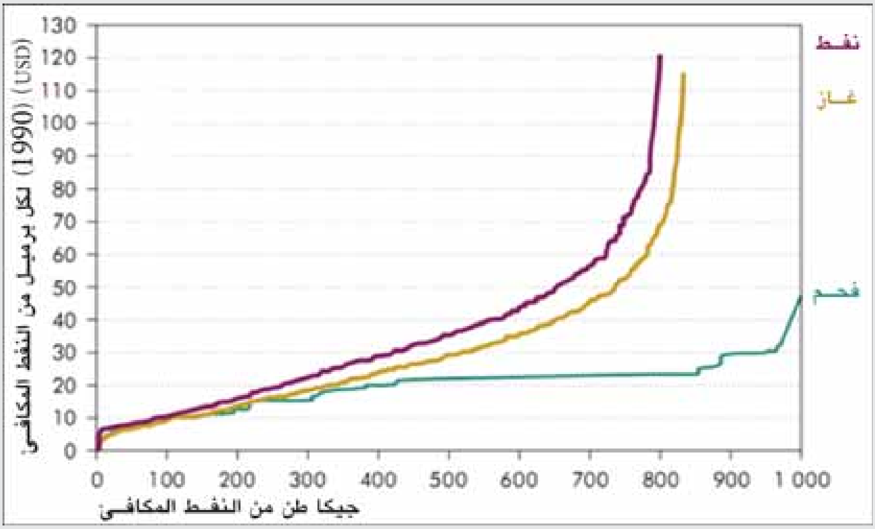
قسمت وكالة معلومات الطاقة في الولايات المتحدة في نموذجها لأنظمة الطاقة الوطنية التنقيب عن النفط والغاز التقليدي وإنتاجهما إلى نشاطات ثانوية (مثال الحفر) وطبّقت سنوياً تخفيض كلفة «تعلّم» كل نشاط على حدة، تتراوح بين حوالى 0.5 في المئة إلى 1.5 في المئة لكل عام. وبالنسبة إلى الغاز غير التقليدي، حددت الـ IEA خطوات تقانية رئيسة مستقبلية ووضعت فرضيات حول توقيتها وتأثيراتها في الكلفة.

لقد أنتج هـ. هـ. روغنر منحني مشابه على مستوى العالم (الشكل 7 ـ 4) في «تقويمه لموارد الهيدروكربون العالمية» (Rogner, 1997). وتوصل إلى هذا المنحني بأخذ تقويمات الخبراء للكلفة (1997) الحالية وتطبيق تخفيض كلفة واحد في المئة لكلّ عام من التعلم. ولذلك فإن منحناه لا يعتبر لقطة خاطفة من حيث الزمن. ومن المفترض أن تمثّل كلفة المستقبل، باعتبار أن نقطة البداية ستبقى دوماً إنتاج الموارد ذات الكلفة الأقل (وهي ليست الحالة في عالم تستطيع فيه الأوبك ممارسة قوة احتكار جزئية). وقد استخدمت وسيلة مشابهة في مشروع الوكالة الأوروبية المموّل لمشروع ساونر (SAUNER, 2000). ومن المشوق أن روغنر استهان بتأثيرات التعلم: وأن تقويماته (جدول 10 في Rogner, 1997) حول كلفة الموارد المختلفة كانت غير ذات صلة بما حصل بعد عام 1997. وفي الحقيقة، فإن الكلفة الحالية للنفط غير التقليدي في كندا كانت أقل بكثير من أرقامه (20 دولاراً إلى 25 دولار في 2004، مقارنة بأرقامه 35 إلى 38 دولاراً في 1990). وهذه تشير إلى أن التعلم يمكن أن يكون أسرع من فرضياته.

استعمل دايفد غرين (Greene, 2003) طرائق مشابهة لطرائق روغنر. وقد أُعيد وضع منحنياته للنفط غير التقليدي في الشكل 7 ـ 5. ويبدو أن فرضياته الخاصة بالطَفَل النفطي تظهر متشائمة جداً مقارنة بتقديرات الكلفة الحالية المنشورة من قبل مؤلفين آخرين (انظر الفصل الثالث) وتظهر منحنيات التعلم أيضاً متواضعة جداً.

تستخدم منحنيات التعلم باستمرار لنمذجة تأثير التقدم التقاني (انظر

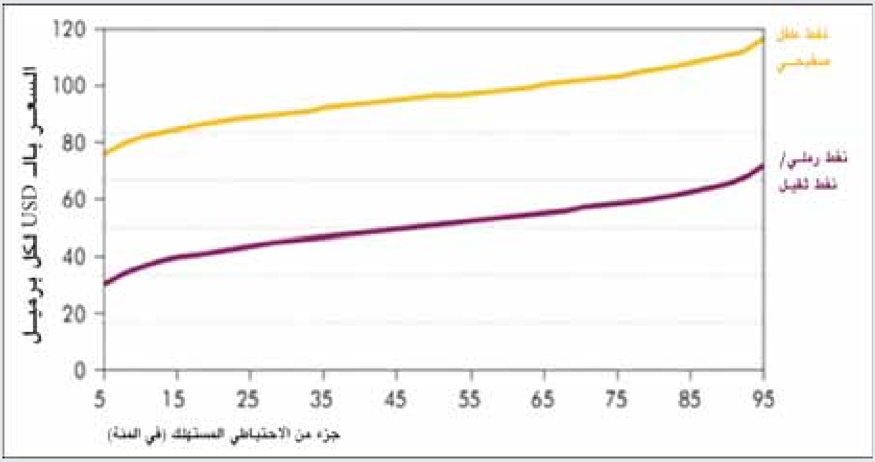
مثلاً، McDonald, 2001 والمراجع فيها). فقد افتُرض في منحني التعلم أن تناقص الكلفة يكون بشكل أسّي بدلالة تراكم المخرجات (مثلاً، مع معدل تعلم 20 في المئة، تكون المادة الـ 200 المنتجة أرخص بـ 20 في المئة من المادة الـ 100 المنتجة. وتكون المادة الـ 2000 المنتجة أرخص بـ 20 في المئة من المادة الـ 1000 المنتجة). ويناقش س. و. واين (C. O Wene) في (Wene, 2004) أنه منذ عام 1988 تقريباً بلغ معدل التعلّم المعتاد في التنقيب عن النفط والغاز، وبقيت كلفة التطور بحدود 20 في المئة (بدلالة الإضافات الاحتياطية التراكمية، ذلك يعني أن الكلفة انخفضت 20 في المئة في كلّ مرة تضاعفت فيها الإضافات التراكمية). ومع ذلك، فإن هذه النتائج تعتمد بشدة على فرضية أن عام 1988 يمثّل خرقاً تقانياً مهماً ونقطة بداية مناسبة للتعلّم. ويفترض التقدير الاستقرائي للمستقبل أنه لن يكون هناك اختراق تقاني مشابه. وإضافة إلى ذلك يمكن المحاججة بأن نماذج منحني تعلم التقانة القياسية لا تنطبق بشكل جيد على صناعات الاستخراج مثل النفط والغاز لأنها ليست قضية تتعلق بصنع المنتوج نفسه باستمرار، بل تتعلق بمعالجة أوضاع جيولوجية أصعب أو أنواع مختلفة من الموارد.



الشكل (7 ـ 4): منحنيات تكلفة النفط والغاز والفحم من روغنر

ملاحظة: يعادل طن واحد مكافئ نفطي تقريباً سبعة براميل مكافئ نفطي.

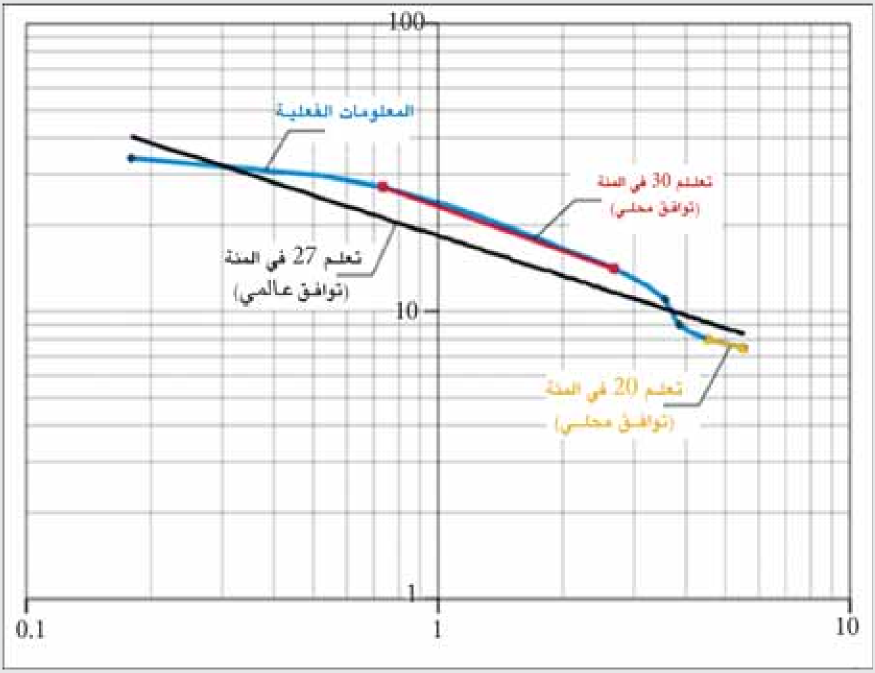
تمّت إعادة طباعتها بإذن من دورية: *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 22 (c) (1997), by Annual Reviews, <http://www.annualreviews>.



الشكل (7 ــ 5): منحنيات التكلفة للنفط غير التقليدي من غرين

أعيد إنتاجها من: (Greene, 2003).

تعطي هذه المعلومات على الأرجح مجالاً لتحليل منحني تعلّم في المستوى المحلي لنوع واحد خاص من الموارد (مثال الرمال النفطية المستخرجة بالتعدين، أو موارد المياه العميقة في عمق يتراوح بين 1000 و2000 متر في خليج المكسيك). إلا أنه من غير الممكن، بشكل عام، تطبيق دراسات كهذه على موارد أخرى. ومن المثير للاهتمام أن رمال النفط الكندية عرضت منحني تعلّم بحوالى 20 في المئة كما توقع وين (الشكل 7 ـ 6) لأن إنتاج النفط غير التقليدي يكون في مراحله الابتدائية (أنتج 10 مليارات برميل، مقارنة بأكثر من 1000 مليار برميل قابلة للاستخراج). وإن معدل 20 في المئة تعلم سيكون له تأثير كبير، ما يسمح للموارد التي تكلّف حالياً 100 دولاراً للبرميل بأن تتراجع أخيراً إلى 20 دولاراً أميركياً للبرميل.



الشكل (7 ـ 6): منحنيات تعلم رمال النفط الكندية ـ سجل الكلفة مقابل سجل تراكم الإنتاج

تحليل IEA للمعلومات المنشورة عن مجلة النفط والغاز ـ مشابه للشكل 3 ـ 3 في الفصل الثالث.

دور الحكومات

ما تجدر ملاحظته أنه ليس من الضروري أن يكون لدى أيٍّ من مشاريع القطاع الخاص أو الشركات الوطنية الحافز لأن تأخذ على عاتقها المجازفة لمعالجة أنواع جديدة من الموارد مثل الرمال النفطية والطَفَل النفطي. ويمكن للاعبين كهذين أن يختارا، مثلاً، التركيز على زيادة مردودات استثماراتهما في المياه العميقة في بيئة سعر نفط مرتفع. وإن تنويع موارد الطاقة لتأكيد سلامة الإمدادات في بيئة سعر متوسط نسبياً هو هدف جيد لمصلحة العموم ربما لا يمكن تلبيته بواسطة لعبة الأسواق الحرة. ومثال حالي على ذلك هو ازدهار النفط الثقيل والرمال النفطية الكندية الناتج من نظام الملكية الأفضل من نظام النفط التقليدي. وكان على هذا النظام أن يشجّع الإقلاع باستثمارات إضافية في التقانة الجديدة التي جعلت هذه الموارد موارد اقتصادية. وكذلك، فإن الازدهار

في طبقة فحم الميثان في الولايات المتحدة بدأت بواسطة الاستثمار العام في بداية الثمانينيات (بالتزامن مع نظام الضريبة مفضل) لتوفير وإيضاح التقانات التي كانت مطلوبة لنوع كهذا من احتياطيات الغاز التي كانت غير عادية في ذلك الوقت. ولذلك فإن المساعدة لتخفيف الخطر في مرحلة مبكرة من الاستثمار في الأنواع الجديدة من الموارد وسيلة تستحق الاهتمام بالتأكيد.

وما تجدر ملاحظته، كذلك، أنه لا يوجد اهتمام كبير بالأنواع الجديدة من الموارد بين فاعلي الخدمة وقطاع الإمدادات الذين يعدون الآن مسؤولين عن القسم الأكبر من البحث والتطوير في الصناعة. فهم بحاجة إلى الحصول على زبائن جاهزين لمنتوجاتهم الجديدة ولا يستطيعون بسهولة ضبط تطوير المنتوجات لسوق غير موجودة حتى الآن. إن الشراكة بين المزودين والمشغلين المستعدة لأخذ تحديات المخاطر المرافقة للموارد الجديدة مهمة جداً للتقدم التقاني.

وعلاوة على ذلك، لا يمكن الاعتماد على الصناعة الخاصة للاستثمار في البحث في التقانات غير الاقتصادية. مثلاً، شهدت تقانات الاستخراج المكثّف للنفط تقدّماً محدوداً منذ ازدهارها في بداية الثمانينيات. وذلك أنها خارج اهتمام الصناعة خلال دورة تراجع أسعار النفط في التسعينيات. وستنعش أسعار النفط المستمرة بالازدياد لفترة الاهتمام، ولكن فقط بعد أن تكون هذه الأسعار قد ارتفعت لبعض الوقت. وسيساهم البحث النشط المستمر، عندما تكون أسعار النفط منخفضة، باحتواء الزيادات المستقبلية للأسعار قبل ظهورها.

تاريخياً، كانت البلدان المنضوية إلى الـ IEA التي يوجد في أراضيها موارد نفط وغاز الأكثر نشاطاً في دعم التطور التقاني في صناعة النفط والغاز (مثلاً، كندا، والنرويج، والولايات المتحدة). وكانت اليابان من الاستثناءات البارزة، وإلى حدٍّ ما فرنسا. وعلى أيٍّ حال، فإن معظم الموارد التقليدية المتبقية والإنتاج المستقبلي هي في الدول غير الأعضاء في الـ IEA. وستصبح كل دول الـ IEA أكثر اعتماداً على منظمة أوبك ـ الشرق الأوسط. وكذلك، فإن كل دول الـ IEA تؤدي من الآن دوراً رئيساً في تطور التقانة، أو أن لديها القدرة على فعل ذلك. وهكذا تشترك بحافز متشابه للمساهمة في التطور التقاني على مستوى العالم الذي يستطيع تأمين إمدادات يعتمد عليها من النفط والغاز بأسعار مناسبة خلال العقود القادمة، في حين يبقى النفط والغاز في المرتبة الأولى لموارد الطاقة في العالم.

لاحظنا من خلال الفصول السابقة، أنه قد يكون في بعض المناطق لسياسات الحكومة تأثير في تطور التقانة. وسيجري تلخيص ذلك في الاستنتاجات الأساسية الآتية.

الاستنتاجات الأساسية

لقد انبثق عدد من التقويمات والمؤشرات من الفصول السابقة، وكذلك من الاستشارات الشاملة مع خبراء الصناعة خلال التحضيرات لهذه الدراسة.

- إن الموارد وفيرة بشكل كاف لتزويد أنظمة الطاقة العالمية بالوقود بأسعار مناسبة في المستقبل المنظور، كما هو موضح في الشكلين (7 ـ 1) و(7 ـ 2).
- إننا بحاجة إلى جهد محدد في البحث والتطوير لجعل التقانات الضرورية متاحة لتطوير هذه الموارد بكلفة فعالة، من أجل تقانات جديدة وأكثر فعالية.
- إن لدى الصناعة بشكل واضح الوسائل والقدرات والحوافز لتقوم بالبحث والتطوير المطلوبين. وستكون الخطوات اللازمة لتشجيع جهود البحث والتطوير مفيدة.
- تستطيع السياسة العامة أن تؤدي دوراً أساسياً بطرق عديدة، لاسيما إذا اعتمدت التركيز على ما يأتي:

● توفير إطارعمل مفضّل للاستثمار في الموارد الجديدة، يشمل الاستثمار المناسب والخضوع للضريبة، والملكية والدعم لمشاريع التدريب، فقد أظهرت التجربة أن هذه الإجراءات يمكن أن تكون أداة في تسريع تعلم التقانة المطلوبة لجعل موارد غير تقليدية منافسة.

● توفير المناخ السياسي الذي يضمن استمرار التعاون النشط بين مطوّري التقانات في دول الـ IEA ومالكي موارد الهيدروكربون في دول الأوبك.

● أخذ المبادرة في دعم التطور التقاني وتسهيل الاستثمار التي تخفّف من الاختناقات.

● المساهمة الفعّالة في تطوير وتسهيل تطبيق التقانات التي تحسن سلامة التركيب والإنشاء.

● التأكيد أن يكون تخفيض انبعاث غاز الـ CO_2 كافياً للشحن البحري لتبنّي انتشار أوسع لتقانة الاستخراج المكثف للنفط المدعم بغاز الـ CO_2، ما سيؤدي إلى معدلات استخراج أعلى.

● دعم العلوم الأساسية في البيولوجيا وعلم البيئة للأنظمة البكتيرية تحت السطحية، حيث إن هذا قد يطلق تقدماً مفاجئاً في استخدام التقانات الحيوية لتحسين الاستخراج أو لتحويل الهيدروكربونات الثقيلة.

● دعم الجهود الصناعية بحذر للحدّ من مخلفاتها البيئية، وبذلك تصل إلى موارد في مناطق جديدة.

● الاستمرار في قيادة تطورات العلوم والتقانة المرتبطة بالاستخدام المستقبلي لحتياطيات هيدرات الميثان، بينما يتم تأكيد مشاركة الصناعة بقوة. إذ إن هذه الموارد قد تكون مهمة جداً للإمدادات طويلة الأمد، غير أنها بعيدة حالياً جداً عن الاعتماد على مساهمات الصناعة بمفردها.

تستطيع المنهجيات السياسية التي استندت إلى هذه الملاحظات المساعدة في بناء شراكات بين الصناعة والحكومة اللتين يتوجب عليهما حماية مصالح كل المساهمين (مالكي الأسهم)، علاوة على التعاون الدولي المستمر على تحسين التقانة المتطورة في أعلى سلسلة صناعة النفط والغاز، إذ هناك حاجة إلى وسائل كهذه إذا ما كان لأسواق الهيدروكربون المستقبلية الوفاء بوعودها.

الثبــت التعريفــي

استخراج النفط المحسّن (IOR) (Improved Oil Recovery): هو مجموع تقانات تساهم بإدارة جيدة للاحتياطي وبتحديد الجيوب الكبيرة من النفط المتجاوز التي لم تستخرج بعد وتنتجه بكلفة اقتصادية فعّالة.

استخراج النفط المحسّن ميكروبيّاً (Microbiologically-Improved Oil Recovery): وهو عبارة عن حقن عضويات مع مغذيات مناسبة في الاحتياطي حيث تتكاثر وتبني مستعمرات أو تستقلب الهيدروكربونات الموجودة، على أن تكون المنتوجات الاستقلابية من النشاط الميكروبي عبارة عن بولمرات حيوية فعّالة قادرة على تحسين حركية النفط أو التقليل من لزوجته وتسهيل سيلانه بشكل أكبر.

تقانة حقل النفط الذكي (SOFT): هي عبارة عن تقانة رقمية متطورة تعتمد بشكل كبير على التقدم في الإلكترونيات وتقانة المعلوماتية والاتصالات بحيث تزرع اللواقط على السطح وفي الآبار للمراقبة المستمرة للتطورات داخل الاحتياط. وتبثّ المعلومات في الزمن الحقيقي إلى غرفة تحكم وتقارن القياسات بنماذج رقمية افتراضية معقدة وتستكمل العمليات باستمرار.

ذروة النفط (Oil Peak): بالتعريف يستخدم هذا المصطلح للإشارة إلى قمة الإنتاج التي تصل إليها الدول المصدرة المنتجة للنفط في العالم وتختلف الذروة النفطية بحسب إمكانية كل دولة تحديد كمية النفط المكتشفة بدقة في السنة، وعلى كامل كمية النفط الموجودة في الأرض. وحسب معادلة هوبرت سنحصل على منحني غوصي تمثل قمته الذروة النفطية.

الطَفَل النفطي (Oil Shale): وهو عبارة عن صخر رسوبي عضوي يشبه الطَفَل النفطي أو الكربونات أو الصلصال الكلسي أو المرل ويحتوي على كميات كبيرة من المركبات العضوية الصلبة تعرف باسم الكيروجين لو اتيح لها أن تدفن في أعماق كافية ستتحول إلى هيدروكربونات (نفط وغاز).

المسح الزلزالي (4D)) (Seismic Scanning) : لقد كان المسح الزلزالي ولايزال واحداً من الأدوات المهمة والرئيسة في التنقيب عن النفط والغاز وإنتاجهما. بدءاً المسح الزلزالي على طول بروفيل لينتج صورة ثنائية البعد لشريحة عمودية لما تحت السطح. ومع التطور التقاني أصبح المسح الزلزالي ينفذ بالأبعاد الثلاثة للحصول على صورة ثلاثية البعد لما تحت السطح. وقد مكنتنا التحسينات المستمرة في تسجيل الإشارة ومعالجة المعطيات مكنتنا من الحصول على صورة ثلاثية البعد للاحتياطي. وسيظهر تكرار هذه المسوح بفواصل زمنية منتظمة حركة السوائل. وهذا هو البعد الرابع.

النفط الثقيل (Heavy Oil) : هو نفط ذو لزوجة عالية فقد معظم عناصره الخفيفة لقربه من السطح من خلال التشققات وهو غير قادر على التدفق في ظروف الاحتياطي. ويوجد هذا النفط عادةً في على أعماق ضحلة وبدرجات حرارة منخفضة نسبياً.

النفط المتبقي (Residual Oil) : يشير هذا المصطلح إلى النفط المتبقي في المسامات الصخرية الصغيرة بعد عملية الاستخراج الأولي وغير القابلة للاستخراج بكلفة مقبولة.

النفط والغاز التقليديان (Conventional Oil and Gas) : هما بالتعريف إنتاج المخزونات الرسوبية تحت السطحية، ويملآن المسامات والشقوق الصغيرة للصخور الرسوبية المدفونة في القشرة الأرضية وينشآن عن دفن وتحوّل الكتل الحيوية المرافقة للرَسوبيّات خلال الأحقاب الجيولوجية الماضية.

نهج الاتصال الأقصى بالاحتياطي (Maximum Reservoir Contact Approach) : بعد أن يتم تحديد المكمن بدقة تكون المهمة الثانية الاتصال الأقصى بالاحتياطي، ويعني ذلك استخدام الآبار الأفقية متعددة الجوانب، وتتبع آخر التطورات التقانية المستخدمة من قبل شركات دولية والسيطرة عليها لرفع إدارة الكلفة والاحتياطيات إلى الحد الأقصى.

هيدرات الميثان (Methane Hydrate) : هي مواد صلبة تشبه بلورات الجليد في بنيتها، تتشكل عندما يمزج الميثان بالماء في درجات حرارة منخفضة وضغط معتدل. وتوجد في قاع البحار أو في مناطق القطب الشمالي المتجمدة. وتعتبر الموارد الأكثر وفرة بغاز الهيدروكربون في الأرض.

ثبت الاختصارات

الاستخراج المكثّف للنفط	EOR
استخراج النفط المحسن	IOR
الاستخراج المكثّف للنفط ميكروبياً	MEOR
دورية استشراف مستقبل الطاقة العالمية	WEO
منطقة شمال أفريقيا/ الشرق الأوسط	MENA
بحث وتطوير	R&D
مكافئ برميل نفطي	BOE
بولمر فاعل بالسطح القلوي	ASP
تسييل الكتل الحيوية	BTL
التقاط وتخزين الفحم	CCS
تقانات حقول النفط الرقمية	SOFT
تقانة الحقول الذكية	I-Field
تسييل الغاز	GTL
تسييل الغاز الطبيعي على نطاق صغير	Micro-LNG
تسييل الفحم	CTL
حقل الكتروني	E-Field
حقن الهواء من الأمام إلى الخلف	THAI
دول الاتحاد السوفياتي سابقاً	FSU
دولار أميركي	USD

شركات صغيرة ومتوسطة	SMEs
غاز نفطي مسيّل	LPG
غاز طبيعي مضغوط	CNG
غاز طبيعي مسيّل	LNG
غرفة ألبرتا للموارد	ACR
وزارة الطاقة الأميركية	DoE
ماء وغاز	WAG
مساهمة البخار في التصريف الثقالي	SAGD
هيئة المسح الجيولوجي الأميركي	USGS
معهد النفط الأميركي	API
معهد النفط الفرنسي	IFP
منتجو النفط والغاز	OGP
منتدى ابتكارات النفط والغاز الأوروبي	EURO GIF
منظمة التعاون والتطوير الاقتصادي	OECD
منظمة الدول المصدرة للنفط	OPEC
منظور تقني طاقوي	ETP
ميثان طبقة الفحم	CBM
نسبة الغاز إلى النفط	GOR
وزارة الاقتصاد للتجارة والصناعة في اليابان	METI
وكالة الطاقة الدولية	IEA
وكالة معلومات الطاقة	EIA

ثبت المصطلحات

إبريّ أو محزز	Stylolite
اتفاقية الـ IEA المطبقة	IEA implementing agreement
احتياطي	Reserve
احتياطي متبق	Remaining reserves
اختناقات	Bottlenecks
استخراج	Recovery
استخراج محسن	Improved recovery
اشتقاق	Derive
أعلى سلسلة الإنتاج	Upstream
أعماق سحيقة	Super deep
إقلاع	Kick-off
أنظمة النفط	Petroleum systems
بئر ذات حفرة واحدة	Monobore
تُحمَل على الظهر	Piggy-back
تخفيف الجز	Shear thinning
تدفق البخار	Steam flooding
تسجيل خلف التغليف	Behind-casing logging
تشبّع النفط المتبقي	Residual oil saturation
تعلّم	Learning
حفر مع التغليف	Casing drilling

Gasification	التحويل إلى غاز ـ تغويز ـ
Technologies	تقانات
Membrane technology	تقانة الغشاء
Conventional	تقليدي
Coking	تكويك (تحويل الفحم إلى كوك)
Hydrocracking	تقطير هيدروجيني
Drain hole	حفرة التصريف
Open-hole	حفرة مفتوحة
Holy grail	مجاهدة مقدسة
Bitumen	بيتومين (حُمَر)
Ore	معدن خام
Peripheral water flooding	دفق الماء المحيطي
Green house effect	الدفيئة ـ تأثير البيت الزجاجي
Oil peak	ذروة إنتاج النفط
Primary	رئيس (أولي)
Oil sands	رمال نفطية
Hydrate existence domain	سيطرة وجود الهيدرات
Majors	شركات كبرى
Independents	شركات مستقلة
Conformance control	ضبط الانطباق
Gas shale	طَفَل غازي
Oil shale	طَفَل نفطي
Magic bullet	طلقة سحرية
Down hole separation and re-injection	عملية الفصل وإعادة الحقن داخل الحفرة
Lean gas	غاز ضعيف

Sour gas	غاز فاسد
Tight gas	غاز محجوز
Steam chambers	غرف البخار
Non-conventional	غير تقليدي
Unrecoverable	غير قابل للاستخراج
Unproven	غير مؤكد
Economically recoverable	قابل للاستخراج بشكل اقتصادي
Technically recoverable	قابل للاستخراج تقنياً
Wettability	قابلية الابتلال
Kerogen	كيروجين
Major resources holders	مالكو الموارد الكبرى
Multi phase	متعدد الأطوار
Multilateral	متعدد الجوانب
Locked-in	مجمّد
Reservoir simulators	محاكيات الاحتياطي
Water-loving	محب/ شره للماء
Oil-loving	محب/ شره للنفط
Probable	محتمل
Stranded	محجوز
Upgraded	محسَّن
Solubilised	مذاب
Oil wet	مرطب بالنفط
Clathrates	مشبّك
Reservoirs	احتياطيات
Discovered/Unproven	مكتشف غير مثبت
Well-to-wheels	من البئر إلى العجلات

Cost curves	منحنيات الكلفة
Multi-cycle Hubbert curves	منحنيات هوبرت متعددة الدورات
Frontier	منطقة حدودية
Resources	موارد
New conventional resources	موارد تقليدية جديدة
Undiscovered resources	موارد غير مكتشفة
Deep water	مياه عميقة
Ultra deep water	مياه عميقة جداً (سحيقة)
Coal mine methane	ميثان منجم الفحم
Mature	نضوج
Assembly-line	نظام تجميع
Synethetic crude oil	نفط خام مصنّع
Residual oil	نفط متبق
By-passed oil	نفط متجاوز
Heavy oils	نفط ثقيل
Basin modeling	نمذجة الأحواض
Reserve growth	نمو الاحتياطي
Five spot pattern	نموذج النقاط الخمس
Virtual reality	واقع افتراضي
Maximum reservoir contact approach	نهج الاتصال الأقصى بالاحتياطي
Agency	وكالة

المراجــــع

AAPG: Hancock, S. [et al.]. «A Preliminary Investigation on the Economics of Onshore Gas Hydrate Production Based on the Mallik Field Discovery.» Paper presented at: *AAPG Hedberg Conference*.Vancouver, BC, Canada, September 2004, <http://www.aapg.org/education/hedberg/past/index.cfm>.

ACR: Alberta Chamber of Resources, Oil Sands Technology Roadmap: Unlocking the Potential, Edmonton, January 2004, <http://www.acr-alberta.com/Projects/Oil_Sands_Technology_Roadmap/OSTR_report.pdf>.

ASPO: Association for the Study of Peak Oil and Gas, whose Web site Contains Extensive References to Literature Arguing for More Conservative Estimates of World Oil and Gas Resources, <http://www.peakoil.net>.

Attanasi, E. D. *Economics and the 1995 National Assessment of United States Oil and Gas Resources*, United States Geological Survey Circular 1145, Washington 1998, <http://pubs.usgs.gov/circ/1998/c1145/c1145.pdf>.

Bret-Rouzaut, N. and M. Thom. «Technology Strategy in the Upstream Petroleum Supply Chain.» *Les Cahiers de l'économie*: no. 57, March 2005.

DoE: United States Department of Energy. »Coiled Tubing and DOE/NETL's Technology Program.» Presentation at International Coiled Tubing Association Lunch, 15 January 2004, <http://www.icota.com/publications/Lunch%20Learn/NETL-ICOTA%20Luncheon%201-15-04%20Final.pdf>.

DoE Shales. United States Department of Energy. *Strategic Significance of America's Oil Shale Resource*. 2004.

Vol. 2: *Oil Shale Resources, Technology and Economics*, March 2004, <http://www.fe.doe.gov/programs/reserves/publications/Pubs-NPR/npr_strategic_significancev2.pdf>, and <http://www.shaleoilinfo.org/library/government/doe_vol2final.pdf>.

DoE CO_2. United States Department of Energy. Six Basin-Oriented CO_2- EOR Assessments Examine Strategies for Increasing Domestic Oil Production. DoE Office of Fossil Energy, 2005, <http://www.fossil.energy.gov/programs/oilgas/eor/Six__Basin-Oriented_CO2-EOR_Assessments_.html>.

Encyclopedia Britannica. Oil Shales, Encyclopedia Britannica Online (2005), <http://search.eb.com/eb/Article?tocld=50648>.

Flint, L. «Bitumen Recovery Technology: A Review of Long Term R&D Opportunities.» Report Prepared for Natural Resources Canada, April 2005, <http://www.ptac.org/links/dl/BitumenRecoveryTechnology.pdf>.

Gielen, D. and F. Unander IEA. *Alternative Fuels: An Energy Technology Perspective*, March 2005, <http://www.iea.org/textbase/papers/2005/ETOAltFuels05.pdf>.

Gower, S. and M. Howard. «Changing Economics of Gas Transportation.» Paper Presented at: *The 22nd World Gas Conference Tokyo, 2003*, <http://www.igu.org/WGC2003/WGC_pdffiles/10175_1046659520_1393_1.pdf>.

Greene, David L., Janet L Hopson and Li Jia. *Running Out of and Into Oil: Analyzing Global Oil Depletion and Transition Through 2050*, ORNL/TM- 2003/259, <http://cta.ornl.gov/cta/Publications/pdf/ORNL_TM_2003_259.pdf>.

Hart's. Rhonda Duey, «Journey to the center of the Earth.» in: *Hart's E & P Net*, February 2005, <http://www.eandpnet.com/e205/0205 exploration tech.htm>.

Hightower, M. [et al.]. *Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill over Water*. Sandia Report SAND2004-6258, December 2004, <http://www.fossil.energy.gov/programs/oilgas/storage/lng/sandia_lng_1204.pdf>.

IEA CCS (IEA: International Energy Agency). *Prospects for CO_2 Capture and Storage*. Paris: OECD/IEA, 2004.

_____ . *World Energy Outlook 2004*. Paris: OECD/IEA, 2004.

_____ . *World Energy Outlook 2005* OECD/IEA, 2005.

IEA Hydrogen (2005) (IEA (International Energy Agency)). *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*. Paris: OECD/IEA, 2005.

IEA WEO (IEA (International Energy Agency)). *World Energy Outlook: 2001 Insights*. Paris: OECD/IEA, 2001.

IEA WEO. *World Energy Investment Outlook: 2003 Insights*. Paris: OECD/IEA, 2003.

Klett, T. R. and J. W. Schmoker. «Reserve Growth of the World's Giant Oil Fields.» *AAPG Memoir*: no. 78, *Giant Oil and Gas Fields of the Decade*, p. 107, American Association of Petroleum Geologists, 2003.

Laherrere, J. »Future of Oil Supplies.» Paper Presented at: *The Seminar Center of Energy Conversion,* Zurich, May 2003, <http://www.oilcrisis.com/Laherrere/zurich.pdf>.

Laske, G and G. Masters. *A Global Digital Map of Sediment Thickness.* EOS Trans. AGO, 78, F483, 1997.

Marquette, G. «Oil and Gas Industries Technology Master Plan.» Presentation at the: *SPE Meeting on Management and Information*, Milan (Italy), 20 April 2004, <http://www.assomineraria.org/news/attach/g.marquette.pdf>.

McDonald, A. and L. Schattenholzer. «Learning Rates for Energy Technologies.» *Energy Policy*: vol. 29, Issue 4, March 2001, pp. 255-261.

Mijnssen, F. C. J. [et al.]. «Maximizing Yibal's Remaining Value.» *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*: vol. 6, no. 4, August 2003, p. 255.

Milkov, Alexei V. «Global Estimates of Hydrate-Bound Gas in Marine Sediments: How Much is Really out There?.» *Earth-Science Reviews*: vol. 66, issues 3-4, 2004, pp. 183-197.

Norway CO_2. Norwegian Petroleum Directorate. Report on Feasibility Study of Projects Entailing CO_2 Injection for Increased Oil Recovery on the Norwegian continental Shelf, 2005, <http://www.npd.no/English/Emner/Ytre+-miljo/co2rapport_pm_260405.htm>.

OECD. «Security in Maritime Transport: Risk Factors and Economic Impact», Directorate of Science, Technology and Industry, DSTI/DOT/MTC 47/Final, 4 September, 2003. Paris: OECD, 2003.

Rogner, H. H. «An Assessment of World Hydrocarbon Resources.»*Annual Reviews of Energy and Environment*: vol. 22, 1997, pp. 217-262. (Annual Reviews Inc).

_____ . *World Energy Assessment*, 2000, chap. 5, <http://www.undp.org/seed/eap/activities/wea/drafts-frame.html>.

Saleri, N. G. [et al.]. «Shaybah-220: A Maximum Reservoir Contact Well.» *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*: vol. 7, no. 7, August 2004, pp. 316-320.

SAUNER (Sustainability and the Use of Non-Renewable Resources). *Summary Final Report*, ENV4-CT97-0692, November 2000, <http://www.bath.ac.uk/~hssam/sauner>.

Schlumberger. «A Niche for Enhanced Oil Recovery in the 1990s» *Oilfield Review*: vol. 4, no. 1, January 1992, <http://www.oilfield.slb.com/media/services/resources/oilfieldreview/ors92/0192/p55_61.pdf>.

Simmons, M. R. *Twilight in the Desert: The Coming Saudi Oil Shock and the World Economy*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2005.

SPE/WPC/AAPG (Society of Petroleum Engineers, World Petroleum Congress and American Association of Petroleum Geologists) (2000) - «Petroleum Resources Classification and Definitions», SPE, Richardson.

Steynberg, A. P. and H. G. N. [et al.]. «Clean Coal Conversion Options Using Fischer-Tropsch Technology.» *Fuel*: vol. 83, issue 6, 2004, p. 765.

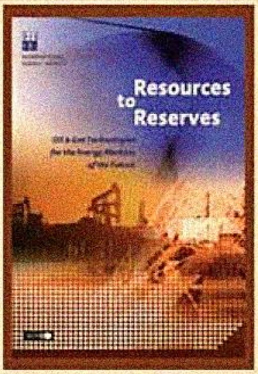
USGS (United States Geological Survey), World Petroleum Assessment 2000, USGS, Washington, <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-060>.

Wene, C. O. Presentation at: *Forum for Energy Modelling*, Bonn, October 2004.

White, C. M. [et al.]. «Sequestration of Carbon Dioxide in Coal with Enhanced Coalbed Methane Recovery - A Review.» *Energy and Fuels*: vol. 19, Issue 3, 2005, p. 659.

Yeten, B., L. Durlofsky and K. Aziz. «Optimum Deployment of Non- Conventional Wells.» Presentation at: *SUPRI-HW 2002 Annual Meeting*, Stanford, California, 2002.

ادخار الموارد(*)



(*) الكتاب الأول من البترول والغاز

السلسلة: تضم هذه السلسلة ترجمة لأحدث الكتب عن التقنيات التي يحتاج إليها الوطن العربي في البحث والتطوير ونقل المعرفة إلى القارئ العربي.

الكتاب: سيبقى النفط والغاز سائدين في سوق الطاقة حتى عام 2030، على أقل تقدير، في حال بقيت سياسات التعامل مع الطاقة ثابتة ولم تتغير. ولكن الطلب على النفط سيتزايد بنسبة 50 في المئة، وسيتضاعف الطلب على الغاز. فما هي مصادر النفط والغاز؟ وهل سنشهد ذروة في استخراج النفط وإنتاجه في المستقبل القريب؟

إن سدّ حاجات العالم من النفط والغاز سيدعو إلى تطوير هائل في مجالي التكنولوجيا والاستثمار. وحتى إذا تمكنت منظمة أوبك (OPEC) من تلبية الطلبات الإضافية، فإن الحاجة تبقى قائمة إلى مزيد من التكنولوجيا المتطورة، وذلك:

- لتوسيع الاستخراج في مكامن معروفة.
- للوصول إلى مكامن جديدة.
- للبدء باستعمال الترسبات غير التقليدية.

وبناءً على ما تقدّم فإنّ هذا الكتاب يعرّف بخواص التكنولوجيات المستخدمة في قطاعات التنقيب، والإنتاج، والنقل، ويوفر تقديرات لأسعار النفط، الأمر الذي يؤدّي إلى إثراء المناقشة حول كيفية تأمين مواد طاقة مناسبة للمستقبل.

المترجم: مظهر بايرلي: دكتوراه في الجيوفيزياء التطبيقية (السيسمولوجي) من جامعة سوانزي البريطانية (1978)، مدير الدراسات العليا والبحث العلمي في جامعة تشرين/ سوريا.

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة

1. المياه
2. البترول والغاز
3. البتروكيمياء
4. النانو
5. التقنية الحيوية
6. تقنية المعلومات
7. الإلكترونيات والاتصالات والضوئيات
8. الفضاء والطيران
9. الطاقة
10. المواد المتقدمة
11. البيئة

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

المنظمة العربية للترجمة

الثمن: 16 دولاراً
أو ما يعادلها

ISBN 978-9953-0-1998-7
9 789953 019987